

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE CASCAVEL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO (ET) EM CITROS POR MEIO DO
ALGORITMO SAFER MEDIANTE O USO DE SENSORIAMENTO REMOTO**

FRANCISCO DE ASSIS DO NASCIMENTO LEÃO

CASCAVEL – PARANÁ – BRASIL

2023

FRANCISCO DE ASSIS DO NASCIMENTO LEÃO

**DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO (ET) EM CITROS POR MEIO DO
ALGORITMO SAFER MEDIANTE O USO DE SENSORIAMENTO REMOTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Oeste do Paraná em cumprimento aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração Sistemas Biológicos e Agroindustriais.

Orientador: Prof. Dr. Erivelto Mercante

Coorientadores: Prof. Dr. Marcio Vilas Boas e Prof. Dr. Marcus Metri Correia

CASCADEL – PARANÁ – BRASIL

2023

FICHA CATALOGRÁFICA¹

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas daUnioeste.

do Nascimento Leão, Francisco de Assis
Determinação da evapotranspiração (ET) em citros por meio do algoritmo SAFER mediante o uso de sensoriamento remoto / Francisco de Assis do Nascimento Leão; orientador Erivelto Mercante; coorientador Marcus Metri Correa. -- Cascavel, 2023.

61 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de Cascavel) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, 2023.

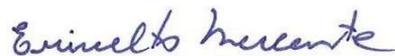
1. Sensoriamento Remoto. 2. Geoprocessamento. 3. Irrigação. 4. Citricultura. I. Mercante, Erivelto, orient. II. Metri Correa, Marcus, coorient. III. Título.

¹ Silvana de Araújo Vaillões – revisora de língua portuguesa, inglesa e normas do programa. Maio de 2023.

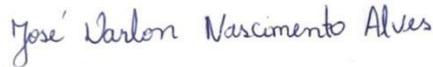
FRANCISCO DE ASSIS DO NASCIMENTO LEÃO

**DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO (ET) EM CITROS POR MEIO DO
ALGORITMO SAFER MEDIANTE O USO DE SENSORIAMENTO REMOTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração Sistemas Biológicos e Agroindustriais, linha de pesquisa Geoprocessamento, Estatística Espacial e Agricultura de Precisão, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



Orientador: Professor Dr. Erivelto Mercante
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Professor Dr. José Darlon Nascimento Alves
Universidade Federal Rural da Amazônia – Campus Capitão Poço (UFRA)



Professor Dr. Benedito Martins Gomes
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Campus Cascavel (UNIOESTE)

Cascavel, 17 de Fevereiro de 2023

BIOGRAFIA

Francisco de Assis do Nascimento Leão é filho de Nazaré Silva do Nascimento e Raimundo Waldiney Aragão Leão, nascido no dia 12 de março de 1997, às 18:00 horas na cidade de Capitão Poço – PA. Concluiu o Ensino Médio no ano de 2013 na Escola Estadual de Ensino Fundamental e Médio Osvaldo Cruz e no ano de 2014 ingressou no Curso de Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) – *Campus* Capitão Poço. Durante a graduação realizou diversas pesquisas acadêmicas, dando início a sua caminhada como pesquisador. No período da graduação foi professor voluntário das disciplinas de Matemática e Física nos programas de extensão de sua universidade, assim como também foi monitor acadêmico e com êxito em 2018 conseguiu em 1º Lugar Geral uma bolsa para realizar um Intercâmbio Acadêmico na Universidad de Talca, em Talca, no Chile. Seu Intercâmbio ocorreu no ano de 2019, e em 2020 ingressou na Universidade estadual do Oeste do Paraná – *Campus* Cascavel para realização do curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, na área de concentração Sistemas Biológicos e Agroindustriais em nível de Mestrado.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a toda a minha família, em especial, à minha mãe, Nazaré Silva do Nascimento; ao meu pai, Raimundo Waldiney Aragão Leão (*in memoriam*), e à minha irmã, Kamilla Thays do Nascimento Leão, que sempre estiveram ao meu lado, apoiando-me, incentivando-me e repassando todo o amor necessário durante a minha jornada até aqui, sempre lutando para que dias como este acontecessem em minha vida. Aos meus avós, Francisco das Chagas do Nascimento e Antônia Silva do Nascimento (*in memoriam*), por todo o amor de vocês. Tenham certeza de que, sem vocês, nada disso estaria acontecendo em minha vida. Essa conquista não é apenas minha, mas sim de todos nós.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as vitórias alcançadas e por sempre me guiar nas jornadas da vida.

Agradeço com os mais sinceros sentimentos à minha mãe, Nazaré Silva do Nascimento, por sempre estar ao meu lado, com seu apoio, amor e carinho. Saiba que tudo isso foi pela senhora.

À minha irmã, Kamilla Thays do Nascimento Leão, por permanecer ao meu lado sempre, pelo apoio e amor repassado. Saiba que tudo isso também foi por você.

Ao meu vovô, Francisco das Chagas do Nascimento, e minha vovó, Antônia Silva do Nascimento, pelo carinho, apoio e amor de vocês.

A toda a minha família, que sempre me apoiaram e incentivaram para a realização deste sonho.

Ao meu professor, orientador e amigo, Dr. Erivelto Mercante, pelos ensinamentos e orientações repassadas.

Ao meus coorientadores, Prof. Dr. Marcio Vilas Boas e Prof. Dr. Marcus Metri Correia.

À CAPES, pela concessão de bolsa para realização da pesquisa.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná, por todas as oportunidades oferecidas.

A todos os professores, que me repassaram conhecimentos de suma importância para o meu aprimoramento profissional.

A todos do Geolab, pelo companheirismo de sempre.

E a todos que contribuíram, direta e indiretamente, para a realização deste sonho.

DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO (ET) EM CITROS POR MEIO DO ALGORITMO SAFER MEDIANTE O USO DE SENSORIAMENTO REMOTO

RESUMO

Leão, Francisco de Assis do Nascimento. **Determinação da evapotranspiração (ET) em citros por meio do algoritmo SAFER mediante o uso de sensoriamento remoto.** Orientador: Erivelto Mercante; Coorientadores: Marcio Vilas Boas; Marcus Metri Correia. 2023. 61 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel – Paraná, 2023.

O Brasil é o maior produtor de laranja e o quinto maior produtor de limão, por isso, práticas de manejo da água que otimizem a produção dessas culturas no país são essenciais. Dentro do manejo da irrigação, há necessidade da estimativa da evapotranspiração (ET). Uma técnica promissora de determinação da ET é por meio da aplicação do algoritmo SAFER em imagens de satélites. Assim, o objetivo deste trabalho foi determinar a evapotranspiração das culturas da laranja e do limão, em Capitão Poço – PA, por meio do algoritmo SAFER. Foram utilizadas imagens dos satélites Landsat 7 e 8, além de coleta de informações meteorológicas das culturas disponibilizadas na estação meteorológica situada na área do estudo, durante o período de julho a dezembro de 2021. Para a determinação da ET pelo método SAFER, foi calculada a ET determinada com dados coletados em imagens de satélite (reflectância, albedo de superfície, Índice de Vegetação de Diferença normalizada (NDVI), radiância espectral e temperatura de superfície) e a evapotranspiração de referência (ET_0), determinada a partir de dados coletados em estação meteorológica (temperatura do ar, umidade do ar, saldo de radiação e velocidade do vento), em que a ET_{SAFER} corresponde ao quociente de ET e ET_0 multiplicado pela ET_0 . Posteriormente, a validação do algoritmo foi realizada com base no método de Penman-Monteith, a partir do cálculo de erro absoluto médio e erro relativo médio. Os valores médios de ET_{SAFER} , para limão e laranja, foram 3,25 ($\pm 0,05$) e 3,36 ($\pm 0,01$), respectivamente. Observou-se um valor máximo do albedo entre as culturas de 0,40, em dezembro; a ocorrência de um maior adensamento na cultura do limão, devido ao maior volume de copa, favoreceu para os maiores valores do NDVI. As imagens dos satélites Landsat 7 e 8 podem ser usadas para cálculo da ET via algoritmo SAFER, pois ofereceram informações preciosas que ajudaram o algoritmo a estimar a variável com precisão para o período estudado. Os valores encontrados via algoritmo (ET_{SAFER}) apresentaram conformidade com os dados observados (ET_C) com precisão de 75%; a estimativa de ET para o limoeiro apresentou melhor desempenho com 74%, enquanto a área cultivada com laranja obteve precisão de 60%.

Palavras-chaves: *Citrus latifolia*, *Citrus sinensis* L. Osbeck, Irrigação, Landsat, Penman-Monteith.

DETERMINATION OF EVAPOTRANSPIRATION (ET) IN CITRUS BY THE SAFER ALGORITHM USING REMOTE SENSING

Leão, Francisco de Assis do Nascimento. **Determination of evapotranspiration (ET) in citrus by SAFER algorithm using remote sensing**. Advisor: Erivelto Mercante; Co-Advisors: Marcio Vilas Boas; Marcus Metri Correia. 2023. 61 p. Dissertation (Master's Degree in Agricultural Engineering) – Western Paraná State University, Cascavel - Paraná, 2023.

ABSTRACT

Brazil is the largest producer of oranges and the fifth largest producer of lemons, therefore, water management practices that improve the production of these crops in the country are essential. Within irrigation management, there is a need to estimate evapotranspiration (ET). Applying the SAFER algorithm on satellite images is a promising technique to determine ET. Thus, this work aimed to determine the evapotranspiration of orange and lemon crops in Capitão Poço, PA, using the SAFER algorithm. Images from Landsat 7 and 8 satellites were used, in addition to collecting meteorological information on the cultures available at the weather station in the study area, from July to December 2021. For the determination of ET by the SAFER method, the ET was determined with data collected from satellite images (reflectance, surface albedo, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), spectral radiance, and surface temperature) and the reference evapotranspiration (ET_0), determined from data collected at a weather station (air temperature, air humidity, radiation balance, and wind speed), where ET_{SAFER} corresponds to the quotient of ET and ET_0 multiplied by ET_0 , was calculated. Subsequently, the algorithm was validated based on the Penman-Monteith method from the calculation of mean absolute error and mean relative error. The mean ET_{SAFER} values for lemon and orange were 3.25 (± 0.05) and 3.36 (± 0.01), respectively. A maximum albedo value of 0.40 was observed between crops in December; due to the larger canopy volume, more significant densification in the lemon crop favored the higher NDVI values. The images from the Landsat 7 and 8 satellites can be used to calculate ET via the SAFER algorithm because they offered precious information that helped the algorithm estimate the variable accurately for the period studied. The values found via the algorithm (ET_{SAFER}) presented conformity with the observed data (ET_C) with an accuracy of 75%; the ET estimate for the lemon tree presented the best performance with 74%, while the orange-grown area obtained an accuracy of 60%.

Keywords: *Citrus latifolia*, *Citrus sinensis* L. Osbeck, Irrigation, Landsat, Penman-Monteith.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiii
1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo geral.....	16
2.2 Objetivos específicos	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 Aspectos gerais das culturas da laranja e do limão.....	17
3.2 Aspectos econômicos dos cultivos da laranja e do limão.....	18
3.3 Importância da irrigação na citricultura.....	19
3.4 Evapotranspiração (ET)	20
3.4.1 Método Penman-Monteith.....	21
3.5 Importância da estimativa da evapotranspiração por meio de sensoriamento remoto.....	22
2	
3.6 Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving – SAFER.....	23
4 MATERIAL E MÉTODOS	25
4.1 Área de estudo	25
4.2 Imagens de satélite.....	28
4.3 Análises estatísticas e índices de validação de modelagem matemática	29
4.4 Base de cálculo do algoritmo SAFER	30
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1 Condições meteorológicas	35
5.2 Parâmetros de entrada do algoritmo SAFER	37
5.3 Validação do algoritmo SAFER	50
6 CONCLUSÕES	52
7 REFERÊNCIAS	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Localização da área de estudo cultivada com as culturas da laranja e limão, localizadas no município de Capitão Poço – PA.....	25
Figura 2 Área de estudo cultivada com a cultura do limão, localizado no município de Capitão Poço – PA.....	26
Figura 3 Área de estudo cultivada com a cultura do limão, localizado no município de Capitão Poço – PA.....	26
Figura 4 Área de estudo cultivada com a cultura da laranja, localizado no município de Capitão Poço – PA.....	27
Figura 5 Área de estudo cultivada com a cultura da laranja, localizado no município de Capitão Poço – PA.....	27
Figura 6 Fluxograma simplificado das etapas para determinação da evapotranspiração utilizando o método SAFER.....	31
Figura 7 Variáveis temperatura média do ar a 2 m de altura (T_s °C), velocidade do vento a 2 m de altura (VV , $m\ s^{-2}$), para as condições agroclimáticas da área de estudo referentes ao ano de 2021.....	35
Figura 8 Variáveis saldo da radiação solar (R_n , $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$), o fluxo total diário de calor no solo (G , $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$), para as condições agroclimáticas da área de estudo referentes ao ano de 2021	35
Figura 9 Variáveis evapotranspiração de referência (ET_0 , $mm\ d^{-1}$) e umidade relativa (RH%) para as condições agroclimáticas da área de estudo referentes ao ano de 2021.	36
Figura 10 Variação do volume de água no solo ao longo do ano (Θ_{us}) de 2021 e precipitação na área de estudo cultivada com as culturas da laranja e limão..	37
Figura 11 Mapa de distribuição espacial e temporal do albedo de superfície para a cultura laranja (A) e limão (B)..	39
Figura 12 Boxplot com valores médios de albedo de superfície (°C) para o cultivo de laranja e limão utilizando o algoritmo SAFER.....	40
Figura 13 Mapa de distribuição espacial e temporal do NDVI para a cultura da laranja (A) e limão (B)..	41
Figura 14 Boxplot com valores médios de NDVI para o cultivo de laranja e limão utilizando o algoritmo SAFER..	42
Figura 15 Análise de regressão entre o volume hídrico do solo ($m^3\ m^3$) em função do NDVI no dia da imagem analisada.....	43
Figura 16 Mapa de distribuição espacial e temporal da temperatura de superfície (°C) para a cultura da laranja (A) e limão (B).....	44
Figura 17 Bloxplot com valores médios de temperatura da superfície (°C) em função dos plantios de laranja e limão para as imagens aplicadas utilizando o algoritmo SAFER..	45

Figura 18 Mapa de distribuição espacial de evapotranspiração pelo SAFER (ET_{SAFER} mm d ⁻¹) para a cultura da laranja (A) e limão (B)..	46
Figura 19 Boxplot com valores médios de evapotranspiração real (ET_{SAFER} mm d ⁻¹) para o cultivo de laranja e limão utilizando o algoritmo SAFER.....	47
Figura 20 Comparação entre a evapotranspiração diária da laranja estimada pelo algoritmo SAFER (ET_{SAFER} , mm d ⁻¹) e evapotranspiração da cultura (ET_C , mm d ⁻¹) em área total selecionada na safra de 2021 (**Indica regressão significativa a $p<0,05$).....	50
Figura 21 Comparação entre a evapotranspiração real diária estimada pelo algoritmo SAFER (ET_{SAFER} , mm d ⁻¹) e evapotranspiração da cultura (ET_C , mm d ⁻¹) para o cultivo da laranja (a) e limão (b) na safra de 2021. (**Indica regressão significativa a $p<0,05$)	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Informações técnicas dos satélites utilizados na pesquisa	29
Tabela 2 Satélite, data da imagem e identificação da imagem (ID).....	29
Tabela 3 Coeficientes do albedo para as bandas do ETM+ e OLI	32
Tabela 4 Média \pm desvio-padrão para TS (C ^o), albedo de superfície (Sa), NDVI e ET _{SAFER} (mm d ⁻¹) para as culturas do limão e laranja	38
Tabela 5 Matriz de correlação de Pearson entres as variáveis de campo e de sensoriamento remoto.....	49

1 INTRODUÇÃO

A citricultura está entre as espécies de frutíferas de maior importância mundial. Nesse cenário, o Brasil ocupa a primeira posição na produção e exportação de laranja, assim como a quinta posição na produção mundial de limão e limas ácidas (FAO, 2020). Entretanto, quando considerada a lima ácida Tahiti, o Brasil é o segundo maior produtor mundial, ficando atrás apenas do México (INFORMATIVO CENTRO DE CITRICULTURA, 2021).

O gênero *Citrus* é cultivado em todo o país e o estado do Pará ocupa a sétima posição nacional em termos de produção de laranja (233.051 t), bem como o quarto lugar em termos de rendimento (28.051 kg ha⁻¹) (IBGE, 2021). Já na produção de limão, o estado é o segundo maior produtor nacional (84.748 t) com rendimento médio superior a 22 kg ha⁻¹ (IBGE, 2021).

No Pará, o município de Capitão Poço apresenta destaque na citricultura. De acordo com o IBGE (2020), no ano de 2019, esse município alcançou a expressiva marca de 78,6% da produção estadual de laranja e conquistou a primeira posição em produção de limão. Isso resultou nos maiores índices de produção de citrus do estado (IBGE, 2020), dispondo de uma área de, aproximadamente, 17 mil ha cultivados com laranja, limão e tangerina (ADEPARÁ, 2020).

O Pará apresenta clima tropical, com chuvas abundantes na estação chuvosa, mas deficiência hídrica no período menos chuvoso (MORAES *et al.*, 2005), que, segundo Köppen, ocorre entre os meses de julho a novembro. Devido a essa característica da região, faz-se necessária a adoção de práticas de manejo que maximizem a produtividade, como a irrigação. Essa, por sua vez, é uma das tecnologias que propicia a verticalização da agricultura, proporciona ganhos em produtividade, possibilita a estabilidade na produção e viabiliza a agricultura durante todo o ano (SOUZA, 2021). Isso porque, de acordo com Coelho *et al.* (2006), o aporte de água às plantas cítricas é imprescindível para assegurar a floração, formação e crescimento dos frutos.

Nesse sentido, diante da importância do manejo hídrico nas culturas da laranja e do limão, buscam-se soluções que otimizem essa prática. Assim, a utilização do Sensoriamento Remoto por imagens de satélites mostra-se como uma alternativa indireta e eficaz para ajudar na determinação da lâmina de água necessária para as culturas, visto que, por meio desse método, é possível estimar a evapotranspiração, sendo essa variável de extrema importância para o sucesso de qualquer manejo hídrico; ademais, contribui com informações importantes para o planejamento e condução dos pomares. Zwart e Bastiaanssen (2007) apontam que o sensoriamento remoto utilizado com foco no uso da água desempenha um papel crucial para que ocorra uma avaliação adequada para o manejo dos recursos hídricos em áreas distintas e flexibiliza a utilização de um método indireto na estimativa da evapotranspiração, pois os métodos diretos, como os lisímetros, possuem uma maior necessidade econômica para sua aplicação.

Por conseguinte, um dos fatores importantes para definir a necessidade hídrica das culturas agrícolas é o conhecimento da evapotranspiração (ET), que pode ser determinada pela utilização de algoritmos com dados provenientes de imagens de satélites, dentre os quais está o SAFER (Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving) (TEIXEIRA, 2010).

O SAFER apresenta algumas vantagens quando comparado a outros algoritmos, tais como o fato de não utilizar informações de classificação das culturas, nem condições extremas de seca e não exigir conhecimento específico de física de radiação, possibilitando a realização de análises de tendências históricas (TEIXEIRA, 2012). Outra facilidade é apontada por Silva (2018), que afirma que a relação entre a ET real e a ET de referência (ET_r/ET_o) é modelada e não há a necessidade de identificar os extremos representados pelos pixels frio e quente. Teixeira *et al.* (2012) enfatizam a simplicidade de aplicação do algoritmo quando comparado com outros, por exemplo, o Sebal, sendo o SAFER apontado como o de maior simplicidade, porém, eficiente, como verificado por Leivas *et al.* (2019) na cultura de coqueiro anão e por Silva, Manzione e Teixeira (2018) no monitoramento/gerenciamento de culturas irrigadas e não irrigadas no município de Petrolina - PE e Juazeiro - BA.

Dessa forma, a utilização desse algoritmo apresenta praticidade e simplicidade, com ausência da necessidade de classificação de cultivares e espaçamentos utilizados; há a vantagem adicional da possibilidade de utilizar dados meteorológicos diários de estações meteorológicas convencionais ou automáticas (SILVA, 2018).

Com base nisto, Teixeira *et al.* (2021) avaliaram o manejo racional da água em pomares de limoeiros sob irrigação localizada (microaspersão e gotejamento) e pivô, na região semiárida brasileira. Por meio da aplicação do algoritmo SAFER em imagens de satélite Landsat 8, constataram que os sistemas de irrigação por pivô não são recomendados nas condições do semiárido, visto que a irrigação localizada permite maior aproveitamento da água. Além disso, verificaram que esse algoritmo pode ser aplicado para estimar a evapotranspiração da cultura (ET_c) do limoeiro com alta precisão. Nesse sentido, corrobora outros resultados já demonstrados da eficiência do método, de maneira que a perspectiva de sucesso para aplicação do algoritmo na região nordeste paraense evolui, a fim de agregar conhecimento do algoritmo aplicado na região

Todavia, vale ressaltar a importância de realizar estudos em diferentes localidades, posto que as condições de cada local influenciam o método de estimativa mais adequado. Assim, partindo do pressuposto de que o algoritmo SAFER se configura como um método rápido, prático, de menor custo para sua aplicação e adequado para determinar a ET_o em regiões tropicais, o objetivo deste trabalho foi determinar a ET das culturas da laranja e do limão, em área localizada no município de Capitão Poço – PA, por meio do algoritmo SAFER aplicado com o uso de imagens obtidas dos satélites Landsat 7 e 8.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estimar a ET das culturas da laranja e do limão, nas condições edafoclimáticas de Capitão Poço – PA, utilizando o algoritmo SAFER por meio de sensoriamento remoto com imagens de satélites.

2.2 Objetivos específicos

- a) Utilizar dados das imagens dos satélites Landsat 7 e 8 para alimentar o algoritmo SAFER no cálculo da variável evapotranspiração (ET);
- b) Calcular a precisão dos resultados encontrados utilizando o algoritmo SAFER, quando comparado com o modelo de Penman-Monteith (padrão FAO56), para as condições de Capitão Poço – PA;
- c) Verificar se o algoritmo SAFER é adequado para estimar a ET das culturas da laranja e do limão nas condições de Capitão Poço – PA.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aspectos gerais das culturas da laranja e do limão

A laranja doce (*Citrus sinensis* L. Osbeck) é uma fruta cítrica produzida em todo o mundo. Macedo (2014) aponta alguns países em que a cultura melhor se adaptou, como os Estados Unidos, México, Espanha e Brasil; além desses, há também os países com climas áridos, como Irã e Israel, que podem obter sucesso na produção dessa fruta, desde que os pomares sejam irrigados.

Registros indicam que a laranja é originária do sul asiático, provavelmente da China, há 4000 anos (NEVES *et al.*, 2010). Posteriormente, na época da colonização do século XVI, foi trazida de Portugal para o Brasil (NEVES *et al.*, 2010; PEREZ; SANTOS, 2015), espalhando-se por todo o território brasileiro. Atualmente, esse *Citrus* está presente em 55.912 estabelecimentos (IBGE, 2017), compreendendo uma área de 578.057 ha e produção de 16.214.982 t (IBGE, 2021).

A laranja, pertencente à família das Rutáceas (Rutaceae), constitui árvore de porte médio, variando de 5,0 a 10,0 m de altura (LORENZI *et al.*, 2006), com folhas brevipetiadas (SWINGLE; REECE, 1967), medindo de 7,0 a 15,0 cm de comprimento, compondo uma copa de formato esférico (CAPUTO, 2012). As flores são brancas e nascem de forma isolada ou em inflorescências, formadas por cinco pétalas (SWINGLE; REECE, 1967; LORENZI *et al.*, 2006). Já os frutos, apresentam formato oval ou esférico, são saborosos, aromáticos e de coloração amarela à laranjada, quando maduros (SWINGLE; REECE, 1967).

Por outro lado, o limão (*Citrus limon* L. Burmann f.) possui centro de origem na Índia (FERREIRA *et al.*, 2018) e foi introduzido no continente americano com as grandes navegações, principalmente, com a chegada de Cristóvão de Colombo às Américas, em 1492 (PIO; LARANJEIRA; GARCIA, 2005). Nos dias atuais, está presente em todo o território brasileiro, em mais de 19 mil estabelecimentos (IBGE, 2017) e área colhida de 58.446 ha (IBGE, 2021).

Trata-se de uma planta com hábito de crescimento ereto e bastante vigoroso; as folhas apresentam formato oval e coloração verde clara; os ramos possuem espinhos de diferentes tamanhos, de maneira que as flores e brotações demonstram coloração roxo purpúreo (FERREIRA *et al.*, 2018). Alves (1986) aponta que o fruto do limoeiro, comparado à laranja, é mais alongado, terminando com duas extremidades proeminentes, apresentando casca grossa e levemente rugosa. Ainda, quando maduro, evidencia grande quantidade de suco de elevada acidez e a presença ou não de sementes, a depender da espécie.

3.2 Aspectos econômicos dos cultivos da laranja e do limão

Com o avanço da produção, cada vez mais, o agronegócio apresenta-se como uma parte extremamente importante para o Produto Interno Bruto (PIB) do país. Em 2021, a participação do agronegócio no PIB foi recorde, alcançando 27,5%; nesse ano, a estimativa é de que o desempenho atinja 25,5%, pouco abaixo do registrado no ano anterior, devido, principalmente, à forte alta dos custos com insumos no setor (CEPEA/ESALQ-USP; CNA, 2022).

Dentro do agronegócio, a citricultura, por sua vez, apresenta elevada representatividade. No Brasil, é uma das mais destacadas atividades da agroindústria, caracterizada como um setor altamente organizado e competitivo, responsável por mais de 75% das exportações mundiais de suco de laranja (CONAB, 2020). Além disso, o país, maior produtor mundial da fruta, destaca-se tanto no quesito quantidade quanto em qualidade (FAO, 2020).

Nesse contexto, em um estudo sobre a exportação brasileira de suco de laranja concentrado, Rissato *et al.* (2021) verificaram que o Brasil detém 85% de participação no mercado mundial desse produto e movimenta mais de 1 bilhão de dólares por ano. Ademais, destacaram que os principais destinos das exportações brasileiras, em 2017, foram a Bélgica, seguido dos Estados Unidos e Holanda.

Não obstante, o Brasil é o quinto maior produtor de limão do mundo (FAO, 2020). As alternativas de comercialização do fruto são variadas, como a produção para mercado de frutas frescas, indústrias de suco e mercado interno ou externo (DIANA; ISIDORO; IKEFUTI, 2021). Em relação a esse último, Neves *et al.* (2010) afirmam que os exportadores brasileiros estão sempre atentos às exigências dos países importadores, as quais, de acordo com Prevideli e Almeida (2020), estão ligadas à segurança alimentar, autenticidade, rastreabilidade e percepção dos consumidores.

Assim, devido à grande participação que a citricultura apresenta em termos nacionais, as frutíferas, que fazem parte desse grupo, estão entre as principais espécies cultivadas para o país, tanto o produto *in natura* como nos mais diversos subprodutos que podem ser oriundos da sua produção (SILVA, 2014). Desse modo, contribuem fortemente nos mais diversos segmentos para o aumento do PIB nacional (EMBRAPA, 2019).

De acordo com dados do IBGE (2019), aproximadamente 70% da área plantada de citrus no Brasil concentra-se na região Sudeste, seguida do Nordeste (16%) e Sul (10%), embora haja cultivo em todas as regiões do país. A área cultivada com laranja segue a mesma proporção de área plantada, enquanto o limoeiro está concentrado nas regiões Sudeste (65%), Nordeste (16%) e Norte (12%).

Em relação ao Pará, estado com significativa contribuição no cultivo de citrus no país, a produção de laranja e limão apresenta relevância nos últimos anos, demonstrando uma

perspectiva de crescimento e, conseqüentemente, aumento na oferta de empregos e renda para os trabalhadores pertencentes ao setor (FAEPA, 2019). Esse destaque se dá pelo avanço das tecnologias adotadas nos cultivos, tal como a utilização da irrigação.

Nessa perspectiva, Coelho *et al.* (2006) comentam que o uso racional da irrigação para o cultivo das espécies, além de possibilitar aumento na produção, agrega consigo um aspecto de desenvolvimento de mercado, dado que engloba uma série de fatores ligados ao agronegócio.

3.3 Importância da irrigação na citricultura

Apesar da grande representatividade do setor da citricultura no país, muitos dos pomares brasileiros apresentam baixas produtividades. Coelho *et al.* (2006) indicam que fatores que explicam essa dificuldade são a implantação das culturas em solos de baixa fertilidade, agravados por adubações inadequadas e déficit hídrico, decorrente de precipitações insuficientes. Dessa forma, a irrigação é um dos fatores essenciais para viabilizar o cultivo de citrus o ano todo, possibilitando o aumento de produtividade dos pomares.

Diante disso, a Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA) (2021) afirma que a irrigação contribui com a segurança produtiva e qualidade dos produtos para o Brasil, dada a importância do país na exportação de frutas. Atualmente, cerca de 85 mil ha de citrus, incluindo laranja, limão e tangerina, são irrigados no Brasil (ANA, 2021). Além disso, a laranja está entre as culturas que mais agregam valor à economia por unidade de área irrigada, da ordem de 17 a 19 mil reais por ha (ANA, 2021).

Entretanto, análises indicam que a adoção da tecnologia de irrigação é proporcional ao tamanho da propriedade (AMENDOLA, 2018) e, certamente, ao poder aquisitivo dos produtores. No cinturão citrícola de São Paulo e Triângulo/Sudoeste Mineiro, em propriedades acima de 1000 ha, o percentual de área irrigada é de 46%, ao passo que, em áreas compreendidas entre 1 e 10 ha, apenas 10,95% das propriedades possuem sistema de irrigação (FUNDECITRUS, 2018).

O fornecimento adequado de água propicia inúmeros benefícios, tais como melhora do desenvolvimento de flores e frutos, redução da queda de frutos e preservação da sua qualidade (SILVEIRA, 2019). Além disso, considerando condições climáticas favoráveis durante o ano, a irrigação favorece a concentração da floração e da colheita, o que acarreta maior produção de frutos viáveis e reduz custos (PIRES; CONCEIÇÃO; COELHO FILHO, 2021).

O consumo anual de água pelas plantas cítricas varia de 600 a 1.200 mm, sendo que, no inverno, o consumo médio é de 1,5 mm dia⁻¹ e, no verão, de 3,2 a 4,7 mm dia⁻¹ (EMBRAPA, 2005; COELHO *et al.*, 2006). Em um estudo do balanço hídrico da cultura da laranja no

período de agosto a fevereiro, Moraes *et al.* (2015) verificaram que o consumo médio de água pelas plantas foi de 2,29 mm dia⁻¹ durante o ano todo, com maior demanda hídrica nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro.

Dessa forma, é importante salientar que

(...) a necessidade hídrica das plantas cítricas varia com a combinação de práticas culturais, estágio de desenvolvimento, uso e manejo das irrigações, idade e condições climáticas, que afetam a absorção e transporte de água na planta, abertura estomática e transpiração (PIRES, CONCEIÇÃO e COELHO FILHO, 2021, p. 464).

Além disso, a demanda é mais elevada em certos períodos, como na brotação, emissão de botões florais, frutificação e início do desenvolvimento dos frutos, e menor nos períodos de maturação, colheita e período de repouso (PIRES; CONCEIÇÃO; COELHO FILHO, 2021). Assim, faz-se necessária a determinação adequada das exigências hídricas em cada estágio de desenvolvimento da planta para que a irrigação seja mais eficiente.

Projeções da ANA (2021) apontam que a demanda hídrica de culturas perenes, como os citrus, no estado do Pará, irá aumentar, considerando o clima médio, de 7,8 m³ s⁻¹ para 13,8 m³ s⁻¹, em 2040. No Brasil, estima-se que o crescimento da área total irrigada será de 76% até 2040, devido, primordialmente, ao aumento da participação de sistemas de irrigação mais eficientes, enquanto a demanda hídrica deverá crescer 66% (ANA, 2021).

Silva (2019) avaliou o efeito da irrigação na produtividade e qualidade dos frutos de laranja por meio de gotejamento superficial em cinco safras consecutivas. Para compor os tratamentos, foram utilizadas lâminas de irrigação equivalentes a 0, 25, 50, 75 e 100% da ET da cultura. O autor verificou que os tratamentos irrigados, quando diferentes estatisticamente, apresentaram incrementos de 15 a 64% em relação ao sequeiro (0% da ET), além de qualidade superior de suco, com menor acidez e maior Ratio.

3.4 Evapotranspiração (ET)

A primeira conceituação do termo ET foi realizada por Thornthwaite (1948), o qual o definiu como o valor da perda máxima de água em uma superfície de solo bem úmido, coberto totalmente por vegetação, em fase de desenvolvimento ativo e com dimensão suficiente para minimizar os efeitos de energia advectiva local. Do mesmo modo, para Penman (1948), a ET concretiza-se como o processo de transferência de água para a atmosfera em uma unidade de tempo, com uma superfície totalmente coberta por vegetação, em desenvolvimento e sem limitação. Caso alguma dessas condições não seja atendida, Filho (2007) aponta que se efetiva a evapotranspiração real (ET_r).

Nesse contexto, conforme Carvalho *et al.* (2013), a evapotranspiração potencial (ET_p) trata-se da transferência de água do sistema solo-planta para a atmosfera. Nessa situação,

ocorrem simultaneamente os dois processos que formam a ET, a evaporação e a transpiração, os quais são difíceis de distinguir (CARVALHO *et al.*, 2013).

Assim, a ET compreende uma ferramenta que auxilia o manejo da irrigação, dado que apresenta o objetivo de suprir a demanda hídrica das plantas de forma eficiente. Para Allen, Tasumi e Trezza (2002), a estimativa da ET é um recurso fundamental na execução da gestão em recursos hídricos, que pode ser utilizada em áreas de diferentes tamanhos e em diferentes estádios de desenvolvimento da planta. Além disso, é um parâmetro crucial para a estimativa do consumo de água pelas plantas, tendo relação direta com o manejo da irrigação, uma vez que é o principal parâmetro para a execução desse manejo agrícola (STEDUTO *et al.*, 2003).

Conforme Allen *et al.* (1998), na fase inicial da cultura, a perda de água se dá geralmente pela evaporação da água pelo solo e, quando já se encontra bem desenvolvida, a transpiração torna-se seu principal processo. Ademais, fatores, como a vegetação, manejo e aspectos do ambiente, levando em consideração o solo, suas características e parâmetros meteorológicos, como radiação, velocidade do vento e umidade, influenciam diretamente a ET (ALLEN *et al.*, 1998).

Simão *et al.* (2015) determinaram a necessidade hídrica da cultura do abacaxi em suas diferentes fases fenológicas, nas condições climáticas de Conceição do Araguaia – PA, por meio da estimativa da ET_c. Os autores verificaram que a necessidade hídrica total foi de 1.532 mm, com maior demanda no término do desenvolvimento vegetativo (152 mm) e indução/diferenciação floral (141 mm). Desse modo, concluíram que a irrigação, determinada pela estimativa de ET_c, além de suprir de forma adequada as exigências hídricas da cultura, torna-se uma estratégia de mercado, posto que permite a antecipação da colheita do abacaxizeiro.

Do mesmo modo, Ferreira *et al.* (2015) estimaram a ET de referência (ET₀) da cultura da melancia durante os seus estádios fenológicos de desenvolvimento, utilizando o método de Penman-Monteith. Foi constatado que a fase com maior demanda hídrica é o estágio reprodutivo (5,2 mm d⁻¹), o que possibilitou o manejo racional da irrigação na área de estudo.

3.4.1 Método Penman-Monteith

Silveira *et al.* (2011) discorrem que, em 1948, o pesquisador Penman criou o método que carrega seu nome (Penman-Monteith), utilizando a combinação do balanço de energia e do método de transferência de massa, de onde ele derivou uma equação para calcular a evaporação de uma superfície em águas abertas, utilizando registros de radiação solar, temperatura, umidade e velocidade do vento.

Após alguns anos, em 1960, Monteith, o segundo protagonista da criação desse método, baseado na equação criada por Penman, chegou à conclusão de que seria possível aperfeiçoá-lo por meio de um novo método que estimasse diretamente a ET_c (CARVALHO *et*

al., 2011). Assim, após pesquisas realizadas por Allen *et al.* (1998) e a publicação dos dados obtidos no boletim FAO 56, o método Penman-Monteith foi reconhecido como padrão para a estimativa da ET_0 .

Por isso, para a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), os métodos empíricos usados para estimativa da ET_0 , devem passar por um processo de calibração e posteriormente serem validados para as regiões, sendo a equação de Penman-Monteith o recomendado pela entidade para ser a referência padrão para os ajustes necessários (SMITH, 1991).

O método padrão é baseado em princípios físicos corretos e necessita de variáveis climáticas mais precisas, como a temperatura do ar, saldo de radiação, velocidade do vento e umidade do ar. Entretanto, em algumas situações, essas informações não estão disponíveis, sendo, por essa razão, que o modelo acaba abrindo a lacuna para que se utilize outro método mais simples que permita estimar a ET (ALENCAR; SEDIYAMA; MANTOVANI, 2015).

Por essa razão, inúmeros trabalhos são conduzidos para verificar se métodos alternativos utilizados para a estimativa da ET são eficientes. Para tal, os pesquisadores realizam a comparação e validação de tais fatores com o método de Penman-Monteith. Exemplos são os trabalhos realizados por Tito (2019) e Cunha *et al.* (2021).

3.5 Importância da estimativa da evapotranspiração por meio de sensoriamento remoto

O sensoriamento remoto (SR) caracteriza-se como um conjunto de técnicas com a finalidade de obter informações sobre objetos sem a necessidade de um contato físico com eles (NOVO; PONZONI, 2001). Logo, com a caracterização física dos objetos e sua posição espectral, é possível monitorar diferentes áreas (AMORIM *et al.*, 2009), o que abre uma gama de possibilidades de aplicação na agricultura, principalmente porque o SR demonstra eficiência no mapeamento de cobertura de áreas em diferentes tamanhos (HANSEN *et al.*, 2013).

O estudo para a estimativa da ET via SR vem agregando importância, pois, por meio dos resultados encontrados na literatura, em estudos realizados com a utilização de imagens de satélite, foi possível encontrar resultados com precisão no produto (FERREIRA JÚNIOR; DANTAS, 2018). Exemplos são os estudos de estimativa da ET via SR realizados por Simão *et al.* (2015) determinando a necessidade hídrica da cultura do abacaxi e Ferreira Júnior *et al.* (2018), analisando o albedo da superfície e os índices de vegetação na bacia hidrográfica do Rio Pacoti/CE por meio de imagens orbitais.

De acordo com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (2017), a utilização do SR, associado com o processamento de imagens e o sistema de informações geográficas (SIG), possibilita o alcance de dados que são cruciais para subsidiar ações referentes ao planejamento e desenvolvimento de diversas áreas, o que proporciona a observação de

mudanças climáticas e possíveis alterações na cobertura vegetal dos biomas, mostrando-se uma ferramenta com grande utilidade para realizar o monitoramento dos recursos naturais em geral.

A utilização da água em campo, por sua vez, pode ser quantificada por meio de diversos métodos, porém, métodos diretos apresentam altos custos, tornando a sua aplicabilidade limitada. Nesse sentido, o uso do SR se apresenta como uma alternativa viável e de baixo custo para quantificar a evapotranspiração real (ET_r) das culturas (SILVA *et al.*, 2012).

Trabalhos realizados com o uso do SR demonstram a obtenção de resultados satisfatórios, principalmente quando usado para a estimativa da ET₀, assim como uma diminuição nos custos para realização da atividade, o que atesta a utilização do SR nas mais diferentes regiões do mundo (BEZERRA, 2013).

À vista disto, a aplicabilidade do SR tem grande potencial para o fornecimento de informações estimadas para a ET, podendo a metodologia ser aplicada em grandes áreas com a necessidade de poucas informações de dados de campo (ALLEN; TASUMI; TREZZA, 2007).

Silva (2020), estudando a ET_c por meio do algoritmo SEBAL e SR para a cultura do açaí, no estado do Pará, observou que os valores encontrados foram satisfatórios, alcançando valores próximos do encontrado pelo método de Penman-Monteith. Da mesma forma, Senay *et al.* (2016) testaram o modelo SSEBop, utilizando imagens do satélite Landsat 8, nos Estados Unidos, e obtiveram resultados com boa concordância, apresentando boa relação entre os valores de evapotranspiração observados e estimados.

Assim, conforme afirma a Embrapa (2015), a funcionalidade disponibilizada pelo SR foi demonstrada em várias ocasiões, por diversas pesquisas nas mais variáveis regiões, de maneira que se chega à conclusão de que o método contribui para a identificação, análise e monitoramento nos recursos hídricos. Por conseguinte, isso torna o trabalho mais eficaz e menos oneroso, mantendo a precisão do estudo, pois a técnica tem se mostrado promissora nas estimativas estudadas (PEREIRA *et al.*, 2015).

3.6 Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving – SAFER

O *Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving – SAFER* (TEIXEIRA *et al.*, 2012) é um algoritmo considerado de simples aplicação, que vem se destacando por apresentar bons resultados na estimativa da ET. Dessa maneira, utiliza informações do albedo, NDVI e temperatura da superfície, e foi desenvolvido com base na equação de Penman-Monteith (TEIXEIRA *et al.*, 2012).

Teixeira *et al.* (2013) apontam que esse algoritmo pode ser aplicado com dados de diferentes estações meteorológicas e não exige o uso de banda termal, dessa forma, acumula

vantagens quando comparados com outros algoritmos, como o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL), para a estimacão da ET. Assim, as informaes obtidas com a utilizao de algoritmos com imagens orbitais mostraram-se uma ferramenta uil para a estimativa da ET quando associada a modelos físicos, como   o caso do SAFER (ANDRADE *et al.*, 2014).

Diante disso, esse algoritmo, devido ao contexto em que se enquadra e os resultados alcançados com a sua recente utilizao, ganhou força no meio agronmico para sua utilizao na estimacão da ET (ANDRADE *et al.*, 2014), podendo ser usado em grandes áreas, como utilizado por Furquim *et al.* (2020), em que estimaram a ET em sistemas integrados do cerrado.

Sales *et al.* (2017) verificaram que os índices estimados pelo SAFER, com o método da FAO 56 para tomate industrial, alcançaram resultados satisfatórios com o uso desse algoritmo. Da mesma forma, Feitosa *et al.* (2016) obtiveram resultados adequados para estudos de balanço energético para a cultura do ip  e Mussi *et al.* (2020) recomendam o algoritmo para a estimativa da ETr na cana-de-auar.

Não obstante, em um estudo realizado por Silva, Manzione e Albuquerque Filho (2019), no qual os autores compararam os algoritmos SAFER e METRIC em variados usos da terra em uma área subtropical localizada no Sudeste do Brasil, eles constataram que os resultados apresentaram similaridade da estima da ET em ambos os modelos, embora o valor máximo, a soma e a variao da ETr pelo algoritmo METRIC foram maiores que o SAFER.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

O experimento foi conduzido na fazenda Citropar Cítricos do Pará Ltda, localizada no município de Capitão Poço ($1^{\circ}48'20,4''$ sul e $47^{\circ}11'53''$ oeste, 68 m de altitude) (Figura 1), pertencente à mesorregião do nordeste do estado do Pará.

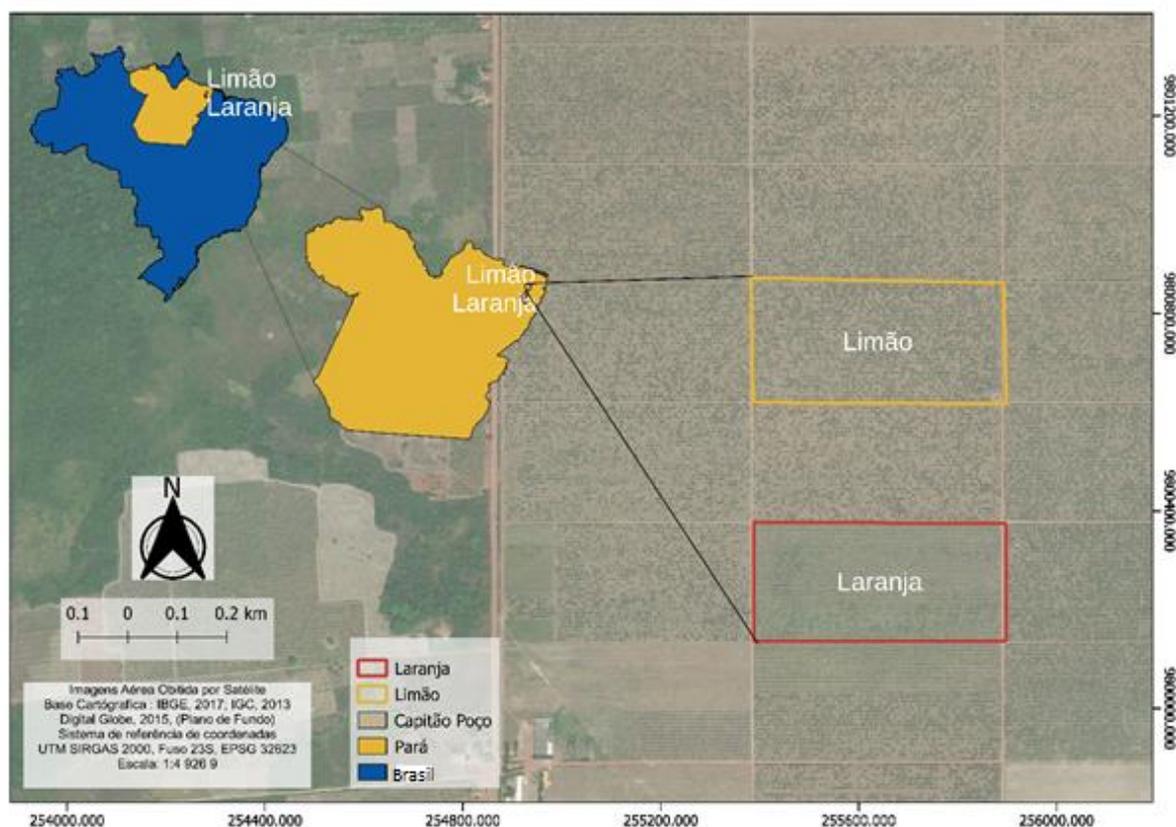


Figura 1 Localização da área de estudo cultivada com as culturas da laranja e limão, localizadas no município de Capitão Poço – PA. Fonte: Autor (2023).

A área utilizada no experimento é predominantemente destinada ao cultivo de limão e laranja, com as plantas apresentando idade de 7 e 5 anos, respectivamente. Os plantios são divididos em quadras que correspondem a uma área de 200 x 500 m (Figura 2, 3, 4 e 5) e o espaçamento entre as plantas de limão 7 x 5 m e as plantas de laranja com um espaçamento 6 x 3 m. As plantas são sujeitas à roçagem mecânica a cada 60 dias e com adubação NPK na formulação 18-20-18 para ambas as culturas.

Antes do plantio de citrus, a área passou por correção da acidez do solo com a utilização Calcário Calcítico.



Figura 2 Área de estudo cultivada com a cultura do limão, localizado no município de Capitão Poço – PA.
Fonte: Autor (2022).



Figura 3 Área de estudo cultivada com a cultura do limão, localizado no município de Capitão Poço – PA.
Fonte: Autor (2022).



Figura 4 Área de estudo cultivada com a cultura da laranja, localizado no município de Capitão Poço – PA.
Fonte: Autor (2022).



Figura 4 Área de estudo cultivada com a cultura da laranja, localizado no município de Capitão Poço – PA.
Fonte: Autor (2022).

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Am, com precipitação anual em torno de 2.500 mm, estação seca entre julho e novembro, e estação chuvosa entre dezembro e junho (SCHWARTZ, 2007). A temperatura média anual é de 26°C e a umidade relativa do ar varia entre 75 e 89%, respectivamente, nos meses de menor e maior precipitação (ALVARES *et al.*, 2013), e o solo é classificado como LATOSSOLO AMARELO de textura média (SANTOS *et al.*, 2018).

A área de estudo possui uma estação meteorológica, de maneira que foram obtidos os seguintes dados meteorológicos: temperatura média do ar a 2 m de altura (T_s C°), velocidade do vento a 2 m de altura (VV, $m\ s^{-1}$), saldo de radiação solar (R_n , $MJ.m^{-2}.d^{-1}$),

fluxo total diário de calor no solo (G , $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), precipitação a 2 m de altura (R , mm), umidade relativa (RH %) e evapotranspiração de referência (ET_0 , $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$) obtida pelo modelo de Penman-Monteith (PM-FAO 56) (Equação 1).

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 278} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que: ET_0 – a evapotranspiração de referência ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$); Δ – tangente à curva de saturação de vapor ($\text{kPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$); R_n – saldo de radiação ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$); G – fluxo de calor no solo ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$); γ – constante psicrométrica ($\text{kPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$); T – temperatura do ar média diária a 2 m de altura ($^\circ\text{C}$); u_2 – velocidade do vento a 2m de altura ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); e_s – pressão de saturação do vapor (kPa); e_a – pressão real de vapor (kPa).

A evapotranspiração da cultura dos citros (ET_c) foi obtida por meio do método da razão de Bowen, utilizando valores do fluxo de calor latente (LE), como proposto por (PEREZ *et al.*, 1999), de acordo com a equação 2:

$$ET_c = \sum_{i=l}^{n=36} \frac{LE_i}{\lambda} \quad \text{Eq. (2)}$$

A quantidade de água no solo foi determinada com base no potencial matricial, alcançado com o uso de tensiomentro. A ferramenta foi instalada em uma distância de 1 m do tronco e 0,3 m de profundidade. As amostras indeformadas obtidas passaram por tensões de 1, 2, 3, 4, 6, 10, 50, 100, 500, 1000 e 1500 kPa e, em seguida, foram pesadas. Todos os valores obtidos passaram por ajustes com auxílio da equação de Van Genuchten (1980). Por meio dos coeficientes da equação (3), foi possível obter os valores de Capacidade de campo e Ponto de Murcha Permanente.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad \text{Eq. (3)}$$

Em que h : potencial matricial do solo; α , n e m : coeficientes da equação; θ : umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$); θ_{cc} : umidade do solo na capacidade de campo; θ_{pm} : umidade do solo no ponto de murcha; θ_r e θ_s : umidade volumétrica residual e saturada do solo, respectivamente.

4.2 Imagens de satélite

As imagens de satélites utilizadas foram do Landsat 7, que tem a bordo o sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), e do Landsat 8, com sensor Operational Land Imager (OLI), os quais, juntos, apresentam um acervo de imagens significativo condicionando

um tempo de resolução temporal de 8 dias (Tabela 1). O período de coleta foi de julho a dezembro de 2021, sendo selecionadas nove imagens que apresentavam incidência de nuvem inferior a 40%. Todas as imagens foram obtidas na plataforma USGS por meio do link (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) (Tabela 2). Contudo, para as imagens que apresentaram nuvem acima de 40%, foi aplicado o filtro para remoção de nuvem pelo plugin *Cloud Masking* no software QGIS (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2021).

Tabela 1 Informações técnicas dos satélites utilizados na pesquisa

Satélite	Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Área Imageada	Resolução Radiométrica	Resolução Temporal
Landsat 7	ETM+	B1	0.450 - 0.515 μm	30 m	183 km	8 bits	16 dias
		B2	0.525 - 0.605 μm				
		B3	0.630 - 0.690 μm				
		B4	0.760 - 0.900 μm				
		B5	1.550 - 1.750 μm				
		B6	10.40 - 12.5 μm	60 m			
Landsat 8	OLI	B2	0.450 - 0.515 μm	30 m	185 km	12 bits	16 dias
		B3	0.525 - 0.600 μm				
		B4	0.630 - 0.680 μm				
		B5	0.845 - 0.885 μm				
		B6	1.560 - 1.660 μm				
		B7	2.100 - 2.300 μm				
	TIRS	B10	10.30 - 11.30 μm	100 m			
B11		11.50 - 12.50 μm					

Fonte: USGS (2021).

Tabela 2 Satélite, data da imagem e identificação da imagem (ID)

Satélite	Data	Dias	ID
Landsat 8	01/07/2021	182	LC08_L1TP_223061_20210701_20210708_01_T2
Landsat 8	26/07/2021	207	LC08_L1TP_222061_20210726_20210804_01_T1
Landsat 8	19/09/2021	262	LC08_L1TP_223061_20210919_20210925_01_T2
Landsat 8	05/10/2021	278	LC08_L1TP_223061_20211005_20211013_01_T1
Landsat 8	14/10/2021	287	LC08_L1TP_222061_20211014_20211019_01_T1
Landsat 8	30/10/2021	303	LC08_L1TP_222061_20211030_20211109_01_T2
Landsat 8	22/11/2021	326	LC08_L1TP_223061_20211122_20211130_01_T1
Landsat 8	01/12/2021	335	LC08_L1TP_222061_20211201_20211209_01_T1
Landsat 7	09/12/2021	343	LE07_L1GT_222061_20211209_20220104_01_T2

Fonte: USGS (2021).

4.3 Análises estatísticas e índices de validação de modelagem matemática

Os dados obtidos na estação meteorológica foram utilizados para estimar a ET_0 pelo modelo de Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 1998), de maneira que, posteriormente, foram relacionados com os adquiridos pelo algoritmo SAFER. Ou seja, os valores de ET encontrados

por meio do SAFER (TEIXEIRA, 2010) foram comparados com os valores de ET_0 estimados por Penman-Monteith, os quais foram avaliados de forma próxima e se encontravam por meio dos métodos de erro absoluto médio (EAM) (Equação 5), erro relativo médio (ERM) (Equação 7) e pelo índice de concordância de Willmott (Equação 8) (WILLMOTT *et al.*, 1985), em que sua métrica determina a variação entre 0, que corresponde a nenhuma concordância, e 1 para a concordância perfeita.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{SAFER} - ET_{CFAO})^2}{n}} \quad \text{Eq. (4)}$$

$$EAM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |ET_{SAFER} - ET_{CFAO}| \quad \text{Eq. (5)}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n (|ET_{SAFER} - ET_{CFAO}|)}{n} \quad \text{Eq. (6)}$$

$$ERM = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{ET_{SAFER} - ET_{FAO}}{ET_{FAO}} \right| \quad \text{Eq. (7)}$$

$$d = 1 - \frac{\sum (Xi - Yi)^2}{\sum (|Xi - \underline{Y}| + |Yi - \underline{Y}|)^2} \quad \text{Eq. (8)}$$

Em que N – número de pares das variáveis; ET_{SAFER} – índice de evapotranspiração encontrado pelo algoritmo e ET_{FAO} – valor referente ao encontrado pelo modelo de Penman-Monteith FAO56.

4.4 Base de cálculo do algoritmo SAFER

O SAFER é um modelo que requer parâmetros físicos obtidos por sensoriamento remoto de imagens de satélite e dados de estações meteorológicas. Diante disso, foram executados procedimentos metodológicos que possibilitaram a obtenção dos seguintes parâmetros: albedo planetário, saldo de radiação, fluxo de calor latente e sensível, fluxo de calor no solo, saldo de radiação emitida pela atmosfera, Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI), albedo de superfície e temperatura da superfície (SAFRE *et al.*, 2022).

A Figura 6 demonstra esquematicamente os passos para a estimativa da ET via algoritmo SAFER.

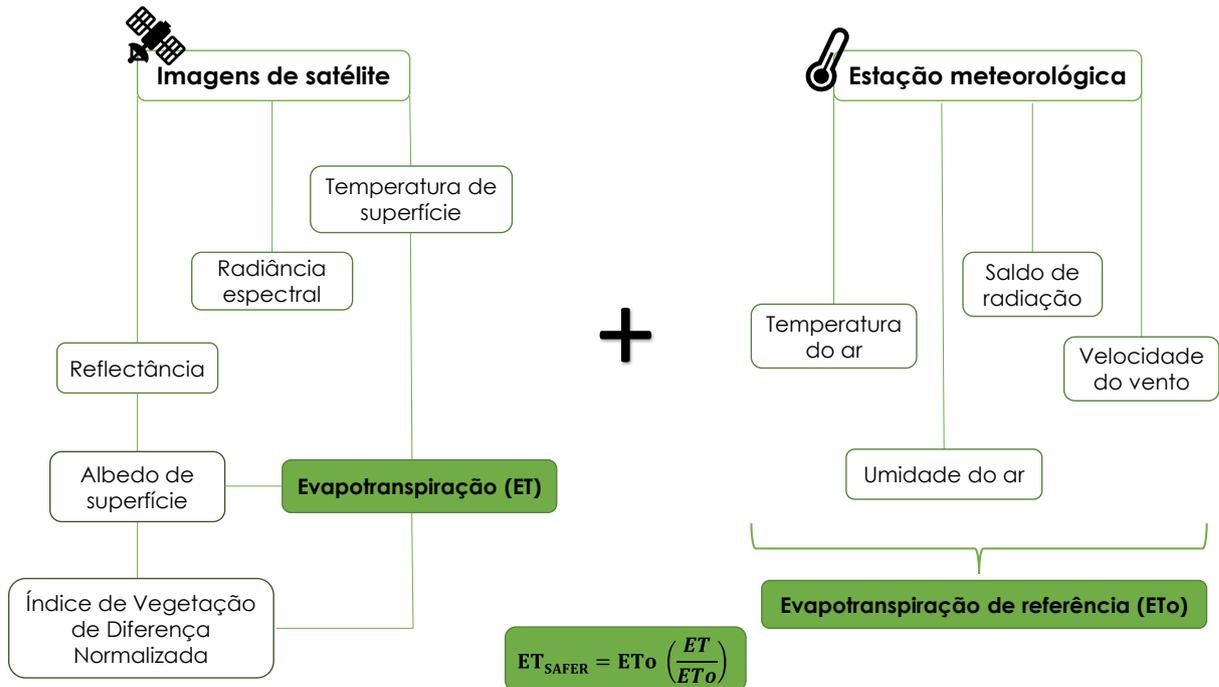


Figura 5 Fluxograma simplificado das etapas para determinação da evapotranspiração utilizando o método SAFER.

De acordo com fluxograma, inicialmente, foi realizada a seleção das imagens e os valores digitais encontrados passaram por uma convenção para obtenção dos valores de radiância. Posteriormente, a intensidade radiante por unidade de área-fonte projetada numa direção específica ($W m^{-2}$) foi calculada pela Equação 9.

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{255} \right) * Q_{CAL} + L_{MIN} \quad \text{Eq. (9)}$$

Em que: L_{MAX} – radiância máxima ($W m^{-2}$); L_{MIN} – radiância mínima ($W m^{-2}$); Q_{CAL} – intensidade do pixel (ND), sendo um número inteiro que varia de 0 a 255.

Em seguida, procedeu-se o cálculo de reflectância para cada banda, a partir dos valores de radiância obtidos na etapa anterior, conforme Equação 10.

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi * L_{\lambda}}{ESUN_{\lambda}} * \cos Z * E0 \quad \text{Eq. (10)}$$

Em que: L_{λ} – radiância de cada banda; $ESUN_{\lambda}$ – irradiância espectral no topo da atmosfera; Z – ângulo zenital; $E0$ – ângulo diário. Sendo que $E0$ é obtido por $E0 = 1,000110 + 0,0342221 \cos x + 0,001280 \sin x + 0,000719 \cos (2x) + 0,000077 \sin (2x)$. Enquanto x é definido pela Equação 11.

$$X = (d_n - 1) * \frac{2\pi}{365} \quad \text{Eq. (11)}$$

Em que: d_n – dia juliano.

Para o cálculo de albedo de superfície (α_s) (Equação 12), as informações foram encontradas pela equação do albedo do topo da atmosfera, utilizando os coeficientes de Teixeira *et al.* (2018).

$$\alpha_s = 0,6054 * \alpha_{top} + 0,0797 \quad \text{Eq. (12)}$$

Em que α_{top} (albedo no topo da atmosfera) foi obtido pela Equação 13.

$$\alpha_{top} = \sum(\omega\lambda * \rho\lambda) \quad \text{Eq. (13)}$$

Em que: $\rho\lambda$ – reflectância (nm); $\omega\lambda$ – coeficiente para cada banda (Tabela 3).

Tabela 3 Coeficientes do albedo para as bandas do ETM+ e OLI.

Sensor	Bandas Espectrais						
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
ETM+	0.293	0.274	0.231	0.156	0.034	-	0.012
OLI	-	0.3	0.277	0.233	0.143	0.036	0.012

Fonte: Allen *et al.* (2002) & Santos *et al.* (2020).

A temperatura de superfície (T_s) foi obtida pelo método residual (ANDRADE *et al.*, 2020) na equação do balanço de radiação (Equação 14).

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{R_G - \alpha_0 R_G + \varepsilon_a \alpha T_a^4 - R_n}{\varepsilon_s \sigma}} \quad \text{Eq. (14)}$$

Em que: R_G – valor diário da radiação solar global incidente ($W m^{-2}$); T_a – temperatura média do ar (K); R_n – saldo de radiação diário ($W m^{-2}$). As emissividades da atmosfera (ε_a) e da superfície (ε_s) foram definidas com base nas Equações 15 e 16, respectivamente, e σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$).

$$\varepsilon_a = a_A (-\ln \tau)^{b_A} \quad \text{Eq. (15)}$$

$$\varepsilon_s = a_s \ln NDVI + b_s \quad \text{Eq. (16)}$$

Em que: τ – transmissividade atmosférica, calculada como a razão de R_G para a radiação incidente no topo da atmosfera ($W m^{-2}$); e a_s , b_s , a_A e b_A são coeficientes de regressão considerados 0,06, 1,00, 0,94 e 0,10, respectivamente, de acordo com Heriberto *et al.* (2014) e Teixeira (2010). O NDVI foi obtido pela Equação 17.

$$NDVI = \frac{(\rho_8 - \rho_4)}{(\rho_8 + \rho_4)} \quad \text{Eq. (17)}$$

Em que: ρ_8 – reflectância da banda 8 – infravermelho próximo; ρ_4 – reflectância na banda 4 – banda no vermelho.

O saldo de radiação (R_n) foi encontrado por:

$$R_n = H + LE + G \quad \text{Eq. (18)}$$

Em que: H – fluxo de calor sensível ($W m^{-2}$); LE – fluxo de calor latente de evaporação ($W m^{-2}$); G – fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$), o qual foi determinado pela Equação 19, conforme proposto por Bastiaanssen (2000).

$$G = [T_s (0,0038 \alpha + 0,0074 \alpha) (1 - 0,98 NDVI)] R_n \quad \text{Eq. (19)}$$

Em que T_s – temperatura da superfície ($^{\circ}C$); α – albedo da superfície e NDVI; R_n – o saldo de radiação ($W m^{-2}$). Vale ressaltar que, para corpos hídricos em que NDVI é negativo, considera-se o termo G (fluxo de calor do solo) como sendo metade do saldo de radiação, ou seja, a relação $G/R_n = 0,5$.

O cálculo do fluxo de calor sensível (H) foi baseado na equação aerodinâmica clássica (FARAH; BASTIAANSEN, 2001). Nesse sentido, para calcular tal variável, utilizou-se a Equação 20:

$$H = \frac{\rho \times C_p \times dT}{R_{ah}} \quad \text{Eq. (20)}$$

Em que: ρ – massa específica do ar; C_p – calor específico do ar à pressão constante ($1004 J kg^{-1} K^{-1}$); dT (K) – diferença de temperatura ($T_1 - T_2$) entre duas alturas (Z_1 e Z_2); r_{ah} – resistência aerodinâmica ao transporte de calor ($s.m^{-1}$).

Para obter os valores do fluxo de calor latente (LE) ($W m^{-2}$), considera-se o fluxo de massa na atmosfera proveniente do processo de ET, sendo obtido como resíduo do balanço entre o saldo de radiação (R_n , $W m^{-2}$), fluxo de calor no solo (G, $W m^{-2}$) e o fluxo de calor sensível (H) (Equação 21).

$$L = R_n - G - H \quad \text{Eq. (21)}$$

Depois de obter os dados do albedo da superfície (α_s), temperatura de superfície (T_s), NDVI e ET_0 pelo método de Penman-Monteith, a pesquisa prosseguiu em calcular os valores instantâneos da relação ET/ET_0 pela Equação 22.

$$ET = \left\{ \exp \left[a + b \left(\frac{T_s}{\alpha_s * NDVI} \right) \right] \right\} ET_0 \quad \text{Eq. (22)}$$

Em que: ET – evapotranspiração diária (mm); T_s – temperatura da superfície ($^{\circ}C$); α_s – albedo da superfície (decimal); coeficiente “a” – considerando o valor 1,0 (TEIXEIRA *et al.*, 2013); coeficiente “b” – considerado o valor de -0,008 (TEIXEIRA, 2012).

Em seguida, após encontrar o valor da relação, a mesma foi multiplicada pelos valores diários de ET_0 (Equação 23), para obtenção da ET atual pelo método SAFER.

$$ET = ET_0 \left(\frac{ET}{ET_0} \right)$$

Eq. (23)

Todo o processamento das imagens foi realizado pelo software QGIS (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2021) e as análises estatísticas foram realizadas no software Estatística (STATSOFT INC, 2011).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Condições meteorológicas

As variáveis meteorológicas médias de longo prazo (temperatura média do ar (T_a °C), velocidade do vento (VV , $m\ s^{-1}$), saldo de radiação solar (R_n , $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$), o fluxo total diário de calor no solo (G , $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$), precipitação (R , mm), evapotranspiração de referência (ETo , $mm\ d^{-1}$) e umidade relativa ($RH\%$)), da safra de 2019, são apresentadas nas Figura 7, 8 e 9.

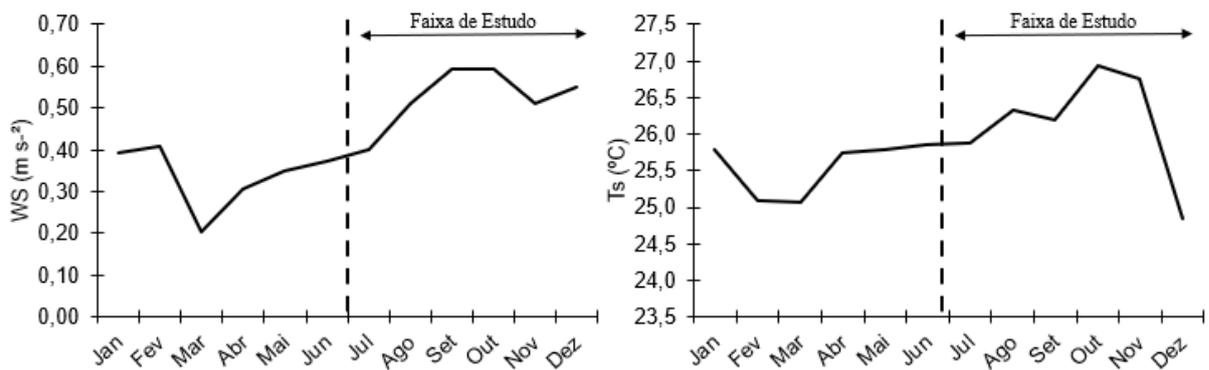


Figura 6 Variáveis temperatura média do ar a 2 m de altura (T_s °C), velocidade do vento a 2 m de altura (VV , $m\ s^{-2}$), para as condições agroclimáticas da área de estudo referentes ao ano de 2021.

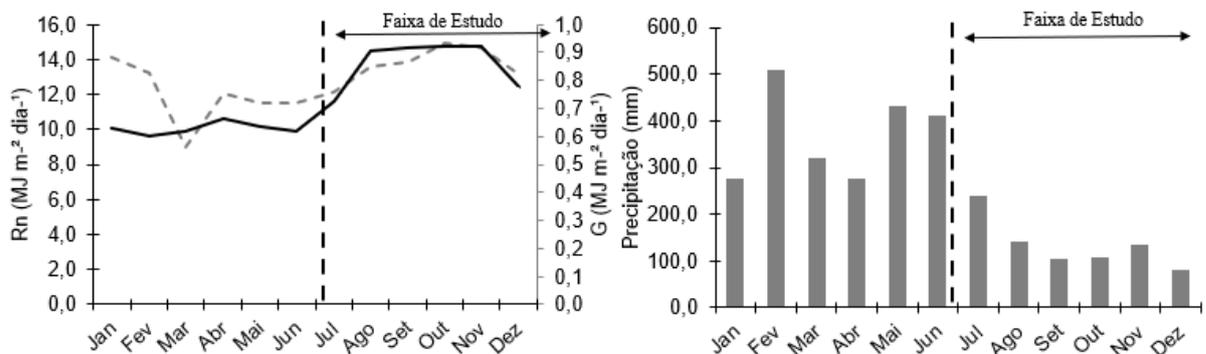


Figura 7 Variáveis saldo da radiação solar (R_n , $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$), o fluxo total diário de calor no solo (G , $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$), para as condições agroclimáticas da área de estudo referentes ao ano de 2021.

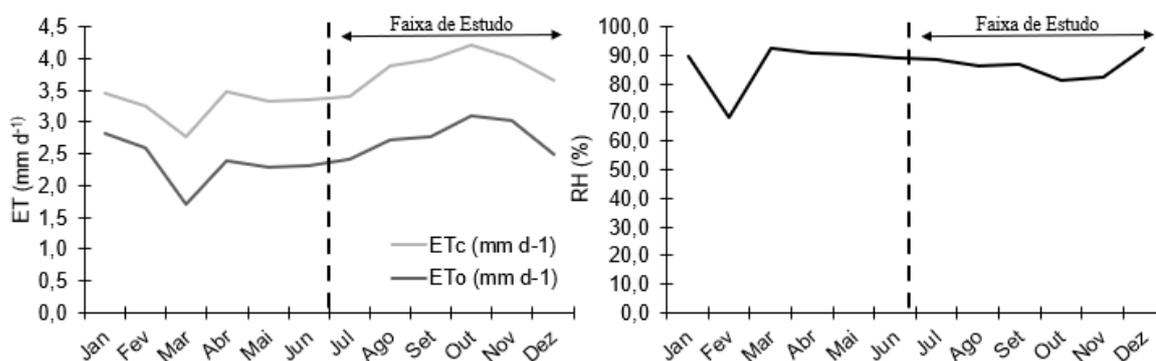


Figura 8 Variáveis evapotranspiração de referência (ET_0 , mm d^{-1}) e umidade relativa (RH%) para as condições agroclimáticas da área de estudo referentes ao ano de 2021.

No período de julho a dezembro, é possível observar um relativo aumento da temperatura, radiação, evapotranspiração e velocidade do vento, as quais são características climáticas típicas da região, exceto por uma ligeira redução da precipitação nessa faixa (Figura 7 e 9). Os dados de ET_0 (mm d^{-1}), observados neste estudo, corroboram os dados de ET_0 diária das estações meteorológicas do município de Capitão Poço, analisados por Gaia (2021), que delimitou o período seco da região entre os meses de julho a novembro, com média anual de ET_0 de $3,5 \text{ mm d}^{-1}$.

Foi observado, para o ano de 2021, nessa área de estudo, 3.015 mm de chuva. No primeiro semestre (janeiro a junho), houve um acúmulo de 72% desse volume (2.217,3 mm de chuva) de modo que apenas 28% dessa precipitação foi distribuída para o segundo semestre (julho a dezembro), destacando que, entre os meses de agosto a outubro, o solo ficou abaixo da água prontamente disponível (RAW), sendo considerados valores abaixo do satisfatório (Figura 10). Essas condições são percebidas como normais para a região e os citros apresentam uma demanda que varia de 840–1220 mm de água por ano, dependendo do solo, variedade, precipitação anual e temperaturas (ENCISO *et al.*, 2005); em sua convenção diária, no inverno, é de 1.5 mm dia^{-1} e, no verão, de 3.2 a 4.7 mm dia^{-1} (COELHO *et al.*, 2006). Outras literaturas observaram consumo dentro dessa margem como de 1.271 mm (Cruz, 2003), de 600 a 1.300 mm (ORTALANI *et al.*, 1991) e 1.341 mm (MORETI *et al.*, 2007).

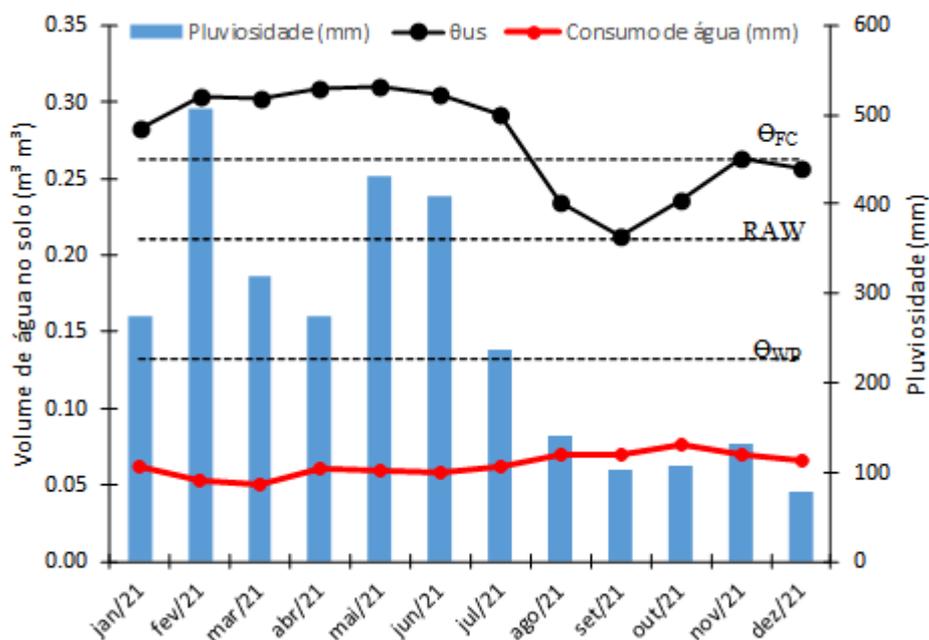


Figura 10 Variação do volume de água no solo ao longo do ano (Θ_{us}) de 2021 e precipitação na área de estudo cultivada com as culturas da laranja e limão.

Não obstante, durante a estação menos chuvosa (julho a novembro), o teor volumétrico de água no solo atingiu uma média de $0,247 \text{ m}^{-3} \text{ m}^{-3}$, que representa 46,64% do total de água disponível no solo (Figura 10). É importante destacar que o valor observado está abaixo das condições hídricas satisfatórias (PINHO SOUSA *et al.*, 2022), contudo, à medida que o conteúdo hídrico do solo reduz, os estômatos foliares se fecham parcialmente, ajustando os processos fotossintéticos e gasoso da planta (KLEIN, 2014). Esse resultado mostrou que a redução moderada da água, prontamente disponível para a planta, não teve alteração em seu ciclo fisiológico e, com isso, proporcionou a floração da cultura para os citros, fato que é comprovado por (TAIZ *et al.*, 2018). As condições climáticas, observadas no estudo, demonstram ambiente de estresse no sistema de produção, principalmente a temperatura, visto que essa tem influência para a floração dos citros; altas temperaturas junto com ambientes secos induzem a desidratação das árvores e favorecem para emissão de flores (BUSTAN e GOLDSCHMIDT, 2002 e IGLESIAS *et al.*, 2007).

5.2 Parâmetros de entrada do algoritmo SAFER

Na Tabela 4, estão apresentados os valores médios e desvio padrão de T_s ($^{\circ}\text{C}$), albedo de superfície (S_a), NDVI e ET_{SAFER} (mm d^{-1}), obtidos pelo processamento das imagens pelo SAFER. Os resultados são consistentes, com desvio padrão para T_s , variando de 0,09 a 0,66, para limão, e 0,08 a 0,45, para laranja, contudo, o S_a e NDVI apresentaram uma variação inferior a 0.11, para ambas as culturas. O desvio padrão da ET_{SAFER} foi $<0,30$, para duas culturas avaliadas.

Tabela 4 Média \pm desvio-padrão para TS (C°), albedo de superfície (Sa), NDVI e ET_{SAFER} (mm d⁻¹) para as culturas do limão e laranja.

Dias	T _s (C°)		Albedo		NDVI		ET _{SAFER} (mm d ⁻¹)	
	Limão	Laranja	Limão	Laranja	Limão	Laranja	Limão	Laranja
182	23,55 \pm (0,16)	23,03 \pm (0,19)	0,30 \pm (0,01)	0,28 \pm (0,02)	0,82 \pm (0,02)	0,79 \pm (0,03)	2,43 \pm (0,01)	2,41 \pm (0,01)
207	25,89 \pm (0,23)	25,17 \pm (0,23)	0,32 \pm (0,02)	0,27 \pm (0,02)	0,71 \pm (0,02)	0,82 \pm (0,01)	3,56 \pm (0,02)	3,57 \pm (0,03)
262	22,45 \pm (0,66)	23,35 \pm (0,45)	0,32 \pm (0,11)	0,31 \pm (0,04)	0,59 \pm (0,11)	0,60 \pm (0,06)	3,35 \pm (0,05)	3,37 \pm (0,02)
278	29,23 \pm (0,28)	27,41 \pm (0,28)	0,30 \pm (0,00)	0,27 \pm (0,01)	0,63 \pm (0,02)	0,76 \pm (0,03)	3,71 \pm (0,01)	3,82 \pm (0,01)
287	29,25 \pm (0,13)	28,04 \pm (0,35)	0,32 \pm (0,01)	0,29 \pm (0,01)	0,63 \pm (0,02)	0,72 \pm (0,03)	3,42 \pm (0,01)	3,47 \pm (0,02)
303	23,35 \pm (0,09)	23,06 \pm (0,15)	0,32 \pm (0,01)	0,29 \pm (0,01)	0,74 \pm (0,01)	0,76 \pm (0,01)	3,63 \pm (0,02)	3,60 \pm (0,01)
326	19,18 \pm (0,11)	19,23 \pm (0,08)	0,33 \pm (0,01)	0,32 \pm (0,00)	0,66 \pm (0,04)	0,70 \pm (0,01)	3,44 \pm (0,01)	3,45 \pm (0,00)
335	15,89 \pm (0,37)	16,19 \pm (0,32)	0,36 \pm (0,00)	0,36 \pm (0,00)	0,66 \pm (0,01)	0,71 \pm (0,01)	3,53 \pm (0,01)	3,52 \pm (0,01)
343	17,10 \pm (0,28)	16,30 \pm (0,29)	0,30 \pm (0,04)	0,40 \pm (0,01)	0,39 \pm (0,06)	0,55 \pm (0,02)	2,16 \pm (0,30)	3,00 \pm (0,01)
Média	22,88 \pm (0,26)	22,42 \pm (0,26)	0,32 \pm (0,02)	0,31 \pm (0,01)	0,65 \pm (0,04)	0,71 \pm (0,02)	3,25 \pm (0,05)	3,36 \pm (0,01)

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 4 apresenta os valores médios de ET_{SAFER} para limão e laranja, sendo 3,25 ($\pm 0,05$) e 3,36 ($\pm 0,01$), respectivamente. Em um estudo conduzido por Teixeira *et al.* (2022), utilizando SAFER para medir a evapotranspiração em diferentes biomas brasileiros, foi observado que a região amazônica apresentou uma média de ET no terceiro trimestre de 2,44 ($\pm 0,74$) e no quarto trimestre de 2,31 ($\pm 0,73$). Por outro lado, estudos realizados em três sistemas de irrigação, na cultura do limão, indicaram valores médios diários de 2,0 mm d⁻¹, para sistemas de gotejamento, no terceiro trimestre, e 3,4 mm d⁻¹, para o sistema de microaspersores, no primeiro trimestre (TEIXEIRA *et al.*, 2022). Além disso, medições de lisímetro, em um pomar de limão localizado no sudeste do Brasil, mostraram uma média de ETc de 2,9 mm d⁻¹ (BARBOZA JÚNIOR *et al.*, 2008).

Os parâmetros de entrada foram albedo de superfície (Figuras 11 e 12), índices de vegetação da diferença normalizado (Figuras 13 e 14), temperatura de superfície (Figuras 16 e 17) e evapotranspiração pelo SAFER (Figuras 18 e 19).

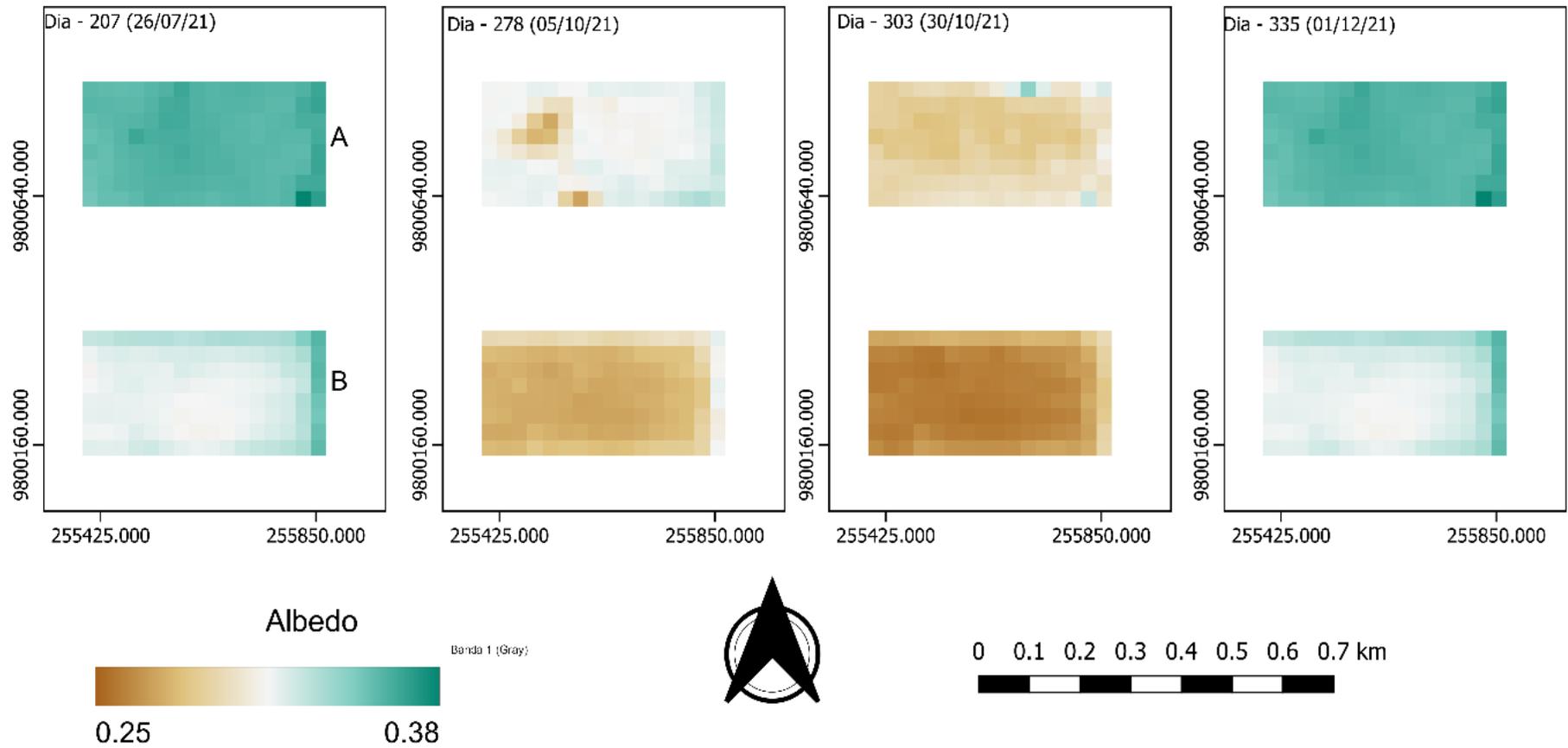


Figura 11 Mapa de distribuição espacial e temporal do albedo de superfície para a cultura laranja (A) e limão (B).

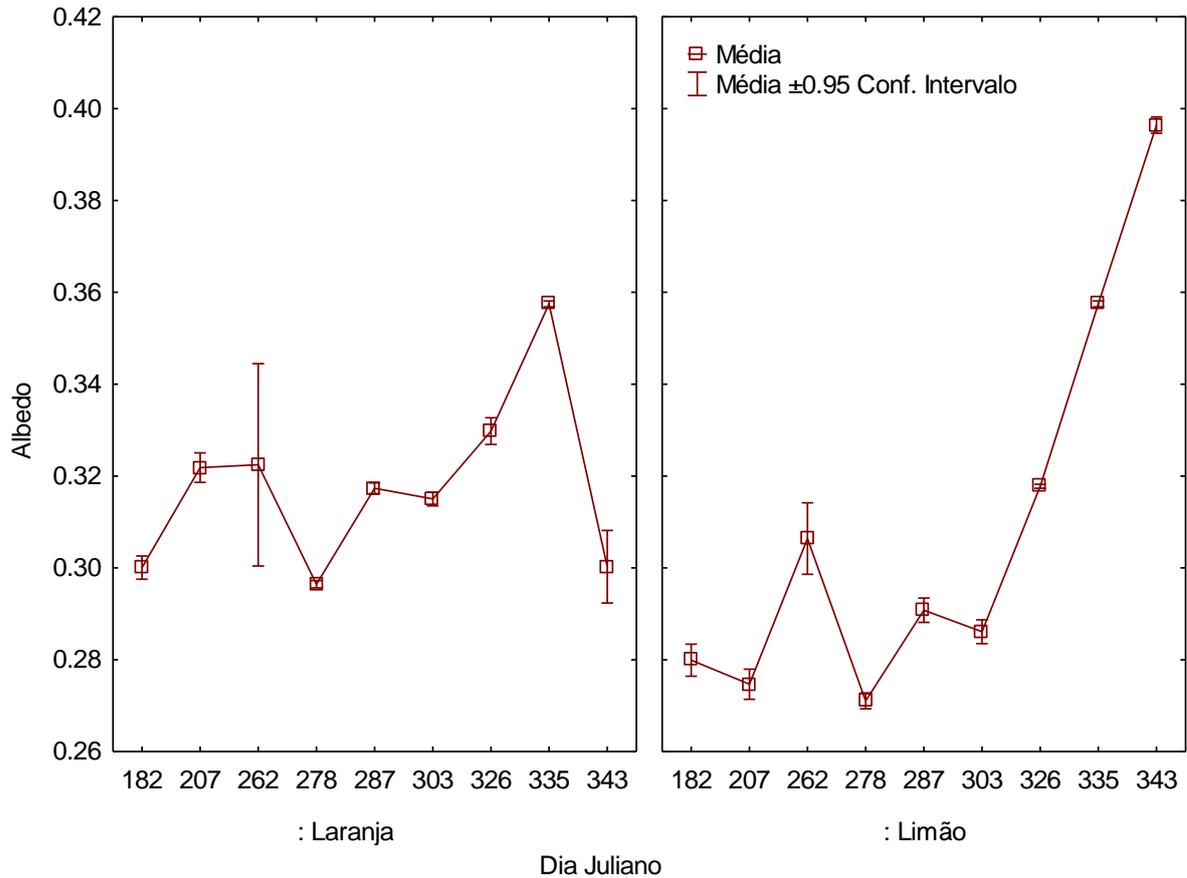


Figura 12 Boxplot com valores médios de albedo de superfície ($^{\circ}\text{C}$) para o cultivo de laranja e limão utilizando o algoritmo SAFER.

Observou-se um valor máximo do albedo de 0,40, em dezembro (DOY 343), contudo, os resultados observados, ao longo do período, corroboram com os encontrados em NDVI e T_s (Figuras 11, 12, 13, 14, 16 e 17). É importante destacar que, nesse período, ambas as culturas estão no final da época chuvosa e colheita (final de novembro e dezembro) e, portanto, é esperado que esse índice, em destaque o NDVI, apresente o comportamento decrescente, devido à redução da atividade fotossintética nesse período, principalmente pelos fatores abióticos (altas temperaturas) (GLENN e TABB, 2019). Segundo Matos *et al.* (2011), a redução da cobertura vegetal aumenta o albedo, como também o baixo conteúdo hídrico no solo.

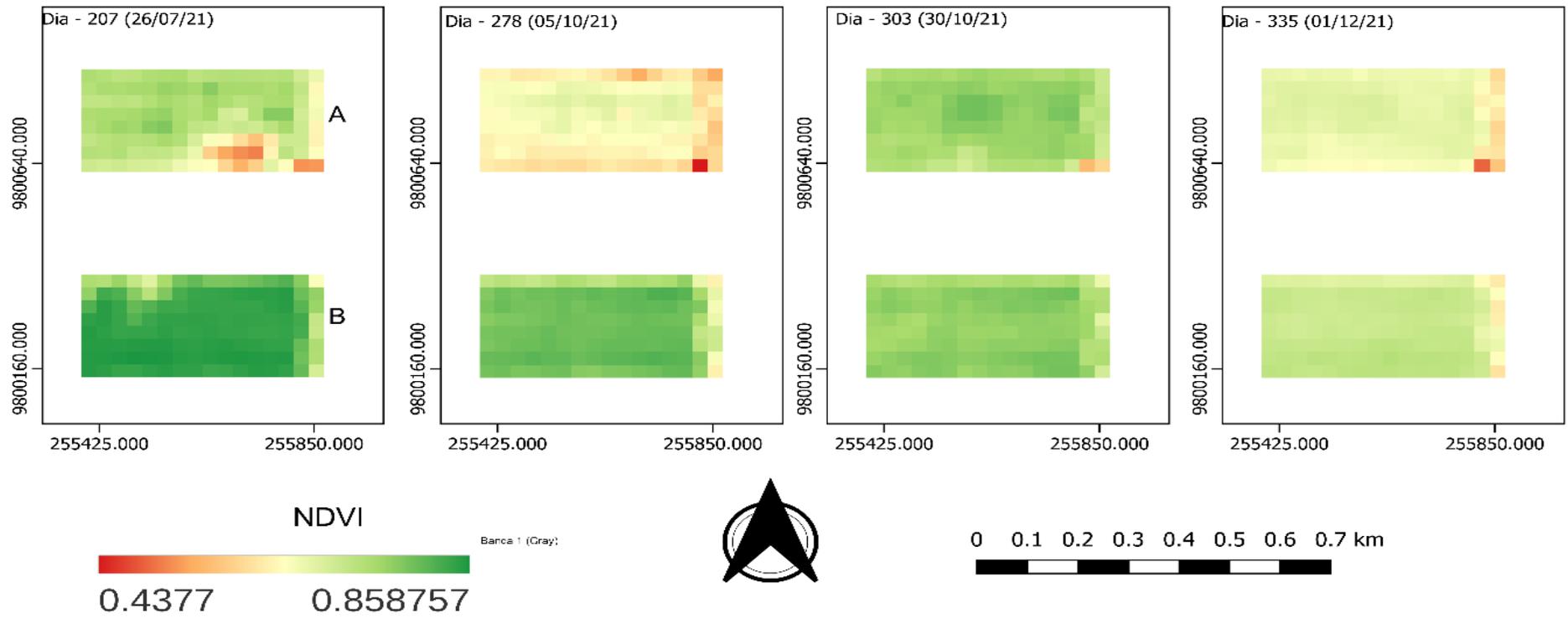


Figura 13 Mapa de distribuição espacial e temporal do NDVI para a cultura da laranja (A) e limão (B).

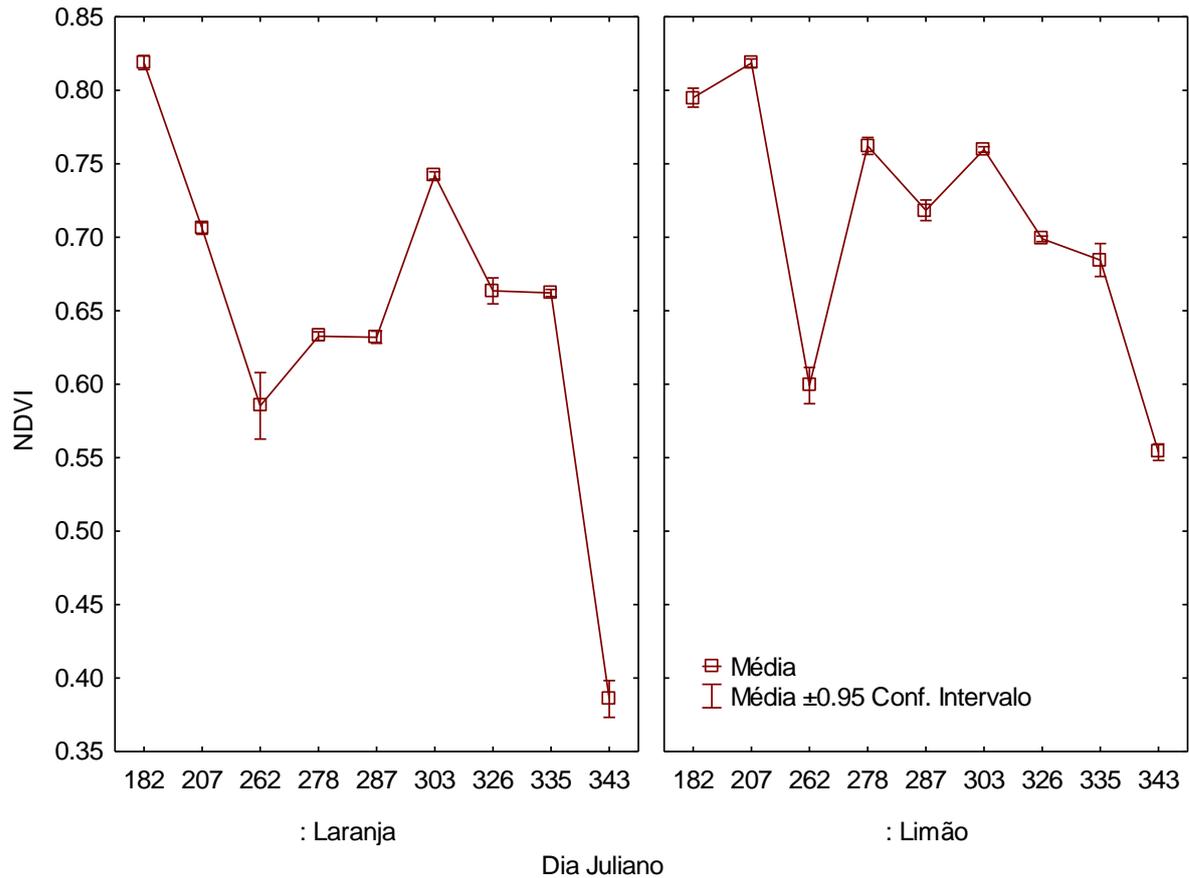


Figura 14 Boxplot com valores médios de NDVI para o cultivo de laranja e limão utilizando o algoritmo SAFER.

A ocorrência de um maior adensamento na cultura do limão, devido ao maior volume de copa, favoreceu para os maiores NDVI. A significativa correlação entre o conteúdo hídrico no solo e o NDVI demonstra o seu efeito no vigor da planta e contribui para afirmação apresentada no estudo, em que a redução do conteúdo hídrico ocasiona um ambiente de estresse abiótico para citros (Figura 15). Tal fato é corroborado pelo resultado observado por Ippolito *et al.* (2022), em que observaram as tendências anuais que resultaram bastante semelhantes, com valores no inverno geralmente maiores do que no verão. Outro ponto importante é a regeneração das plantas daninhas na entrelinha, tendo em vista que, na área de estudo, o sistema de produção utiliza como controle a roçagem para a planta daninha.

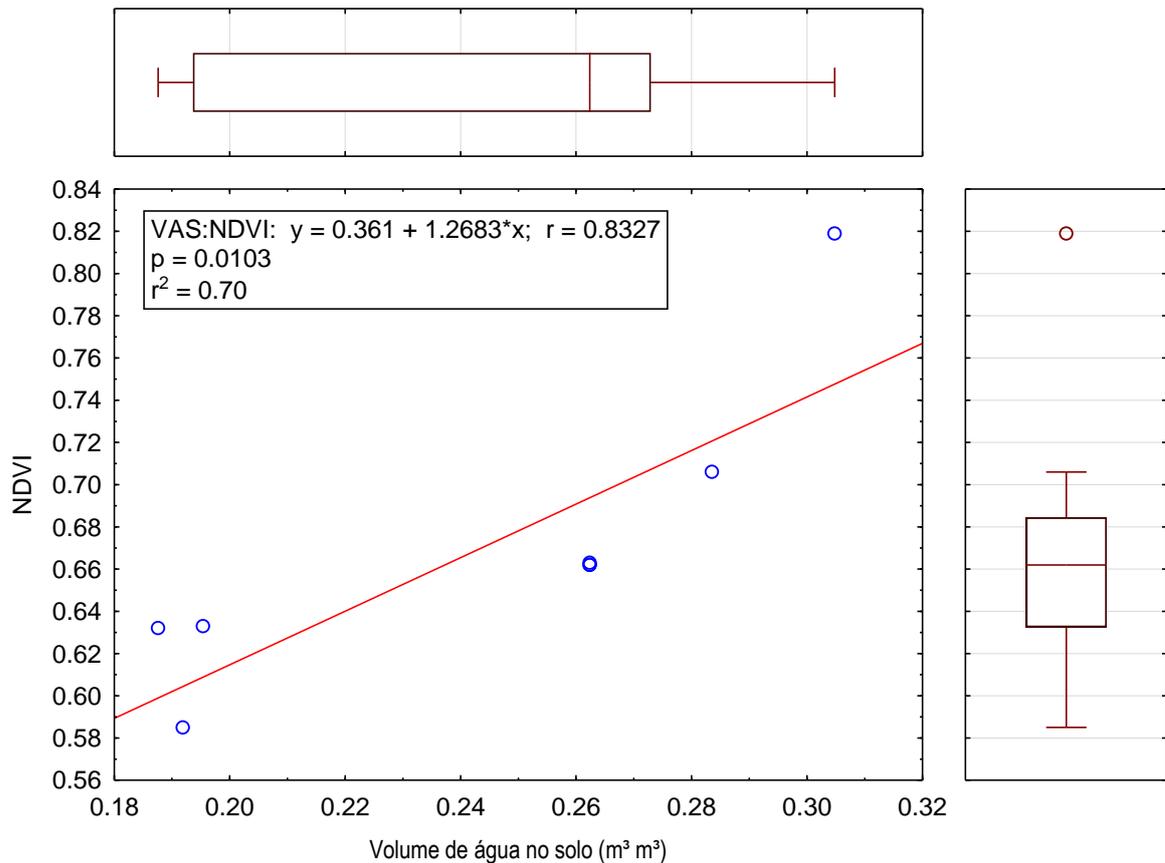


Figura 15 Análise de regressão entre o volume hídrico do solo ($\text{m}^3 \text{m}^3$) em função do NDVI no dia da imagem analisada.

A citricultura, na região nordeste paraense, é caracterizada por apresentar duas colheitas anuais, na safra principal, entre maio e junho, e na “temporã”, compreendida entre o final de novembro e dezembro. As imagens obtidas neste estudo constataram a redução do NDVI, albedo de superfície e do conteúdo hídrico no solo, além do aumento da temperatura e evapotranspiração entre os meses de agosto a outubro (Figuras 10, 12, 14, 17 e 19). Portanto, a T_s apresenta um expressivo aumento entre os meses de setembro até final de outubro, o que condiz com a baixa pluviosidade para esse período, que é caracterizado pela estação quente da região. Por outro lado, no final de dezembro, inicia-se a fase chuvosa da região amazônica (Figuras 16 e 17). A elevação da temperatura do ar pode ampliar a taxa de evapotranspiração, o que se torna especialmente preocupante durante períodos de baixa precipitação pluvial, uma vez que pode restringir a quantidade de água acessível às plantas. Nesse contexto, a perda de água acontece em uma velocidade superior à sua absorção, por parte das plantas, de maneira que pode gerar condições de estresse hídrico que prejudicam a qualidade e o rendimento dos frutos cítricos (TAIZ *et al.*, 2018).

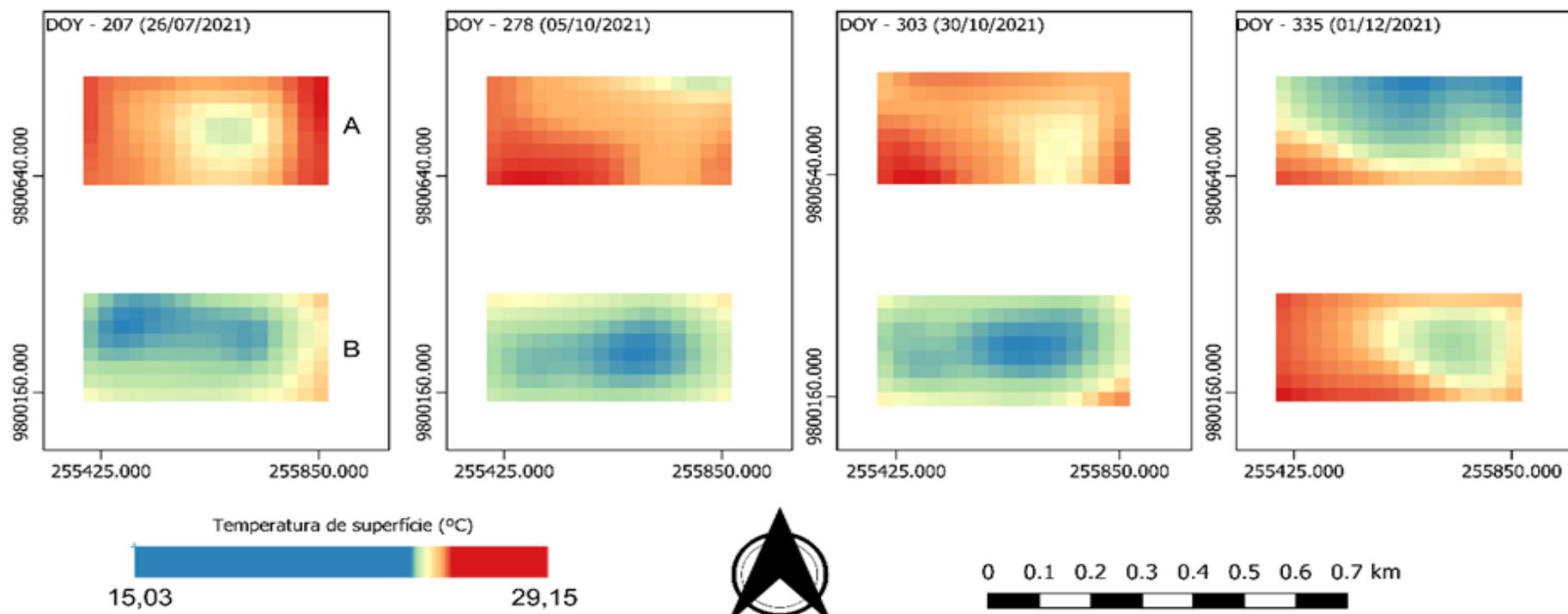


Figura 16 Mapa de distribuição espacial e temporal da temperatura de superfície (°C) para a cultura da laranja (A) e limão (B).

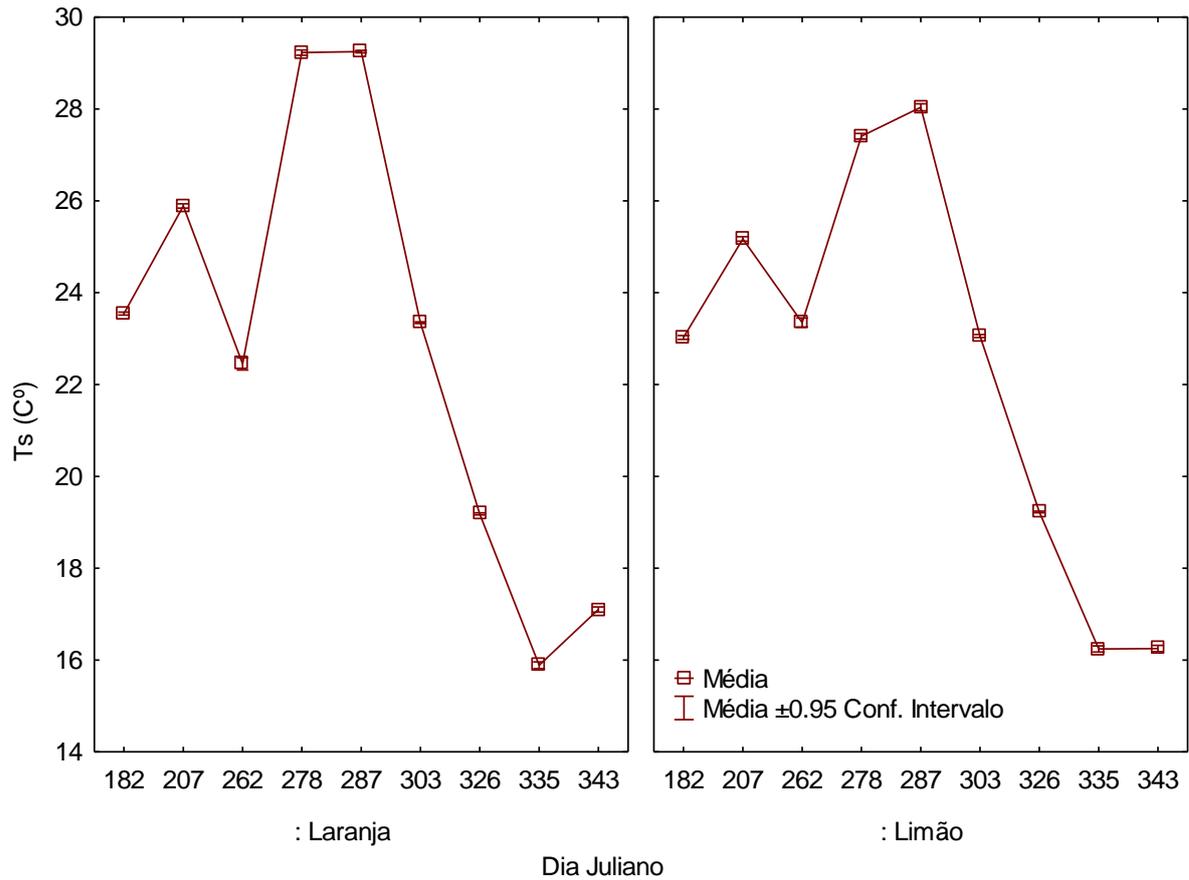


Figura 9 Bloxplot com valores médios de temperatura da superfície (°C) em função dos plantios de laranja e limão para as imagens aplicadas utilizando o algoritmo SAFER.

Resultados obtidos por Teixeira *et al.* (2022) revelaram que os maiores consumos de água pela cultura do limão e as maiores taxas de atividade fotossintética ocorreram no primeiro (janeiro a março) e quarto (outubro a dezembro) trimestres do ano. Acontece que o aumento do consumo hídrico está diretamente ligado ao processo fotossintético da planta (DOS SANTOS *et al.*, 2020). Além disso, a T_s , quando correlacionada com os parâmetros NDVI e S_a , corrobora os resultados encontrados com a estimativa de ET_{SAFER} .

Por outro lado, a ET_{SAFER} apresentou o maior pico em outubro, com valor de 3.8 mm d⁻¹ e 3.7 mm d⁻¹ para limão e laranja, respectivamente (Figuras 18 e 19).

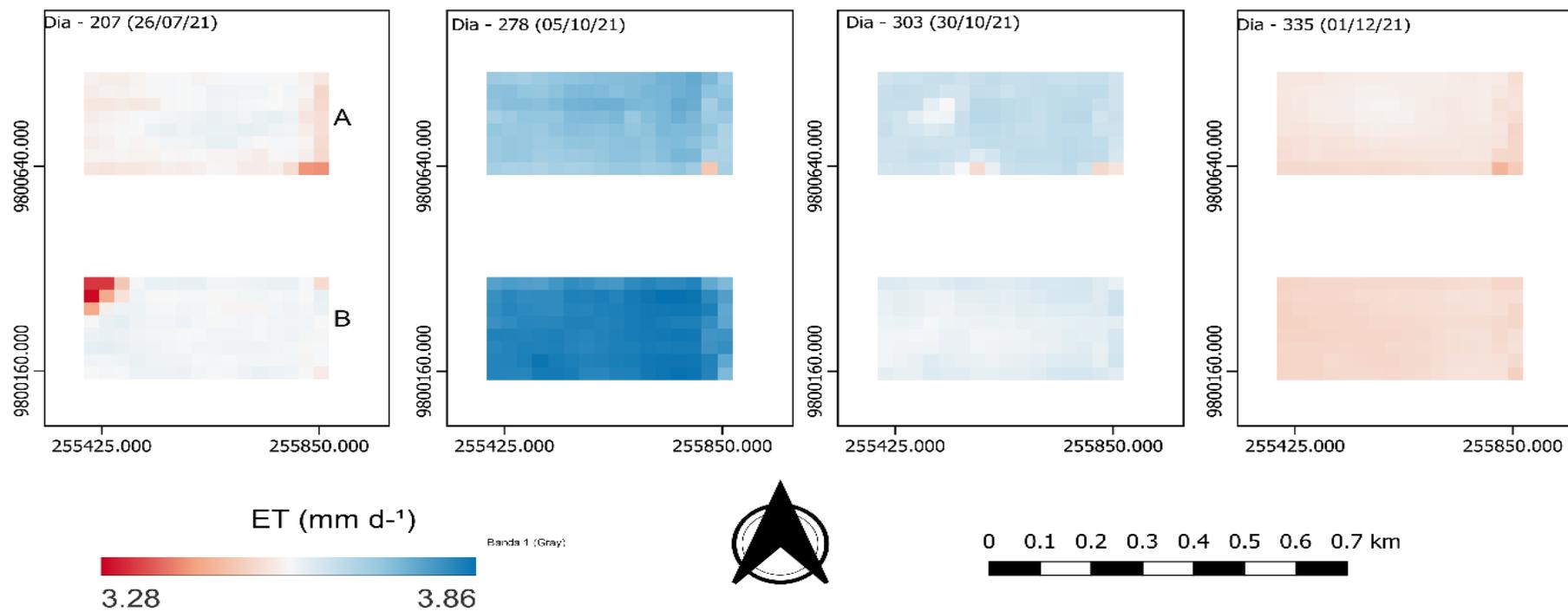


Figura 18 Mapa de distribuição espacial de evapotranspiração pelo SAFER (ET_{SAFER} mm d⁻¹) para a cultura da laranja (A) e limão (B).

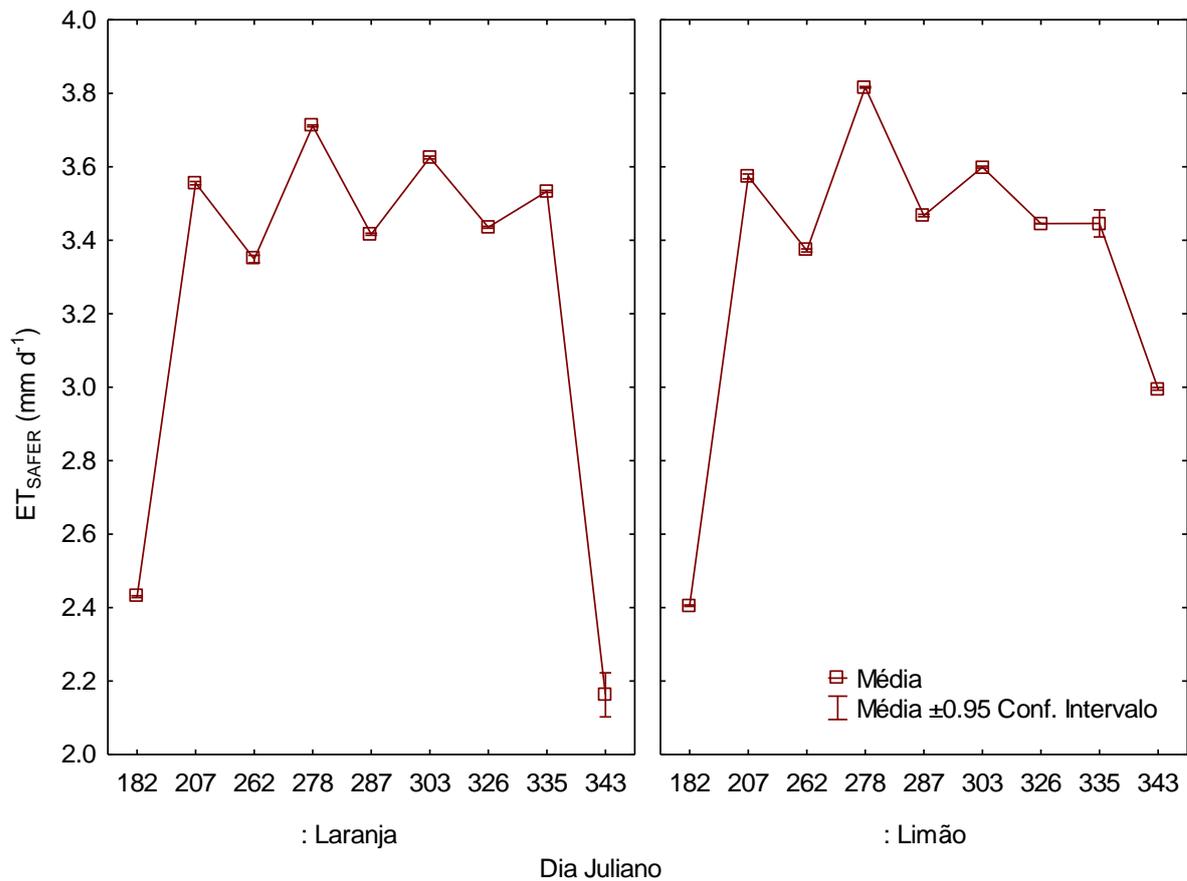


Figura 19 Boxplot com valores médios de evapotranspiração real (ET_{SAFER} $mm\ d^{-1}$) para o cultivo de laranja e limão utilizando o algoritmo SAFER.

Considerando o levantamento de campo e dados de sensoriamento, foi realizada uma matriz de correlação para avaliar o grau de influência entre as variáveis analisadas no estudo (Tabela 5). O NDVI destaca-se com maior número de correlações forte entre as variáveis ET_c , ET_0 , Saldo de radiação solar (R_n), ET_{O-PT} , Precipitação, θ_{us} , ET (Limão) e ET (Laranja). Assim, é diretamente proporcional ao volume de chuva; em contrapartida, as demais variáveis apresentaram comportamento negativo em que, quando maior a evapotranspiração e volume de água, menor será o NDVI da cultura. Portanto, é evidenciada a forte influência dos fatores agroclimáticos para o desenvolvimento dos citros na região nordeste paraense. Outras variáveis também apresentaram alta correção, como saldo de radiação solar (R_n , $MJ.m^{-2}.d^{-1}$).

O saldo de radiação solar, que é a diferença entre a radiação solar que atinge a superfície terrestre e a radiação solar refletida de volta para o espaço, é um importante fator na evapotranspiração, que é a combinação de evaporação da água do solo e transpiração da vegetação. A magnitude desse saldo de radiação solar influencia diretamente a temperatura da superfície terrestre, que é um dos principais fatores que regula a evapotranspiração (FLUMIGNAN *et al.*, 2018).

Em áreas onde o saldo de radiação solar é elevado, a temperatura da superfície terrestre aumenta, resultando em um aumento na evaporação da água do solo e na transpiração da vegetação. Isso ocorre porque o aumento da temperatura aumenta a energia térmica no solo, o que facilita a evaporação da água presente no solo e a transpiração da vegetação. Além disso, altas temperaturas também podem aumentar a atividade metabólica das plantas, estimulando ainda mais a transpiração.

Por outro lado, em áreas com um saldo de radiação solar baixo, a temperatura da superfície terrestre diminui, o que reduz a evapotranspiração. Isso ocorre porque as temperaturas mais baixas reduzem a energia térmica no solo, o que dificulta a evaporação da água presente no solo e a transpiração da vegetação. Além disso, temperaturas mais baixas também podem reduzir a atividade metabólica das plantas, reduzindo a transpiração.

Em geral, o saldo de radiação solar alto é favorável para a fotossíntese e, portanto, para um NDVI mais alto, indica uma vegetação mais saudável. No entanto, valores muito altos de saldo de radiação solar podem ser prejudiciais à vegetação, ocasionando a dessecação ou queimadura das folhas. O Albedo apresentado na matriz de correlação elucidada, de forma conclusiva, que, quanto maior for o seu valor, menor será a temperatura da superfície e a radiação dissipada, de forma que, conseqüentemente, essa energia é convertida em calor (Tabela 5).

Tabela 5 Matriz de correlação de Pearson entre as variáveis de campo e de sensoriamento remoto.

VV	Variáveis de campo									Variáveis do Sensoriamento Remoto						
	ET _c	ET _o	K _c	Rn	G	Tar	UR	ET _o -PT	Precipitação	VV	θ _{us}	ET (Limão)	ET (Laranja)	Ts	NDVI	Albedo
ET _c	—															
ET _o	0.99***	—														
K _c	-0.21 ^{ns}	-0.55 ^{ns}	—													
Rn	0.95***	0.97***	-0.44 ^{ns}	—												
G	0.68 ^{ns}	0.66 ^{ns}	-0.23 ^{ns}	0.74*	—											
Tar	0.37 ^{ns}	0.59 ^{ns}	-0.72*	0.40 ^{ns}	0.18 ^{ns}	—										
UR	-0.42 ^{ns}	-0.57 ^{ns}	0.54 ^{ns}	-0.39 ^{ns}	-0.21 ^{ns}	-0.93***	—									
ET _o -PT	0.93***	1***	-0.55 ^{ns}	0.97***	0.66 ^{ns}	0.59 ^{ns}	-0.57 ^{ns}	—								
Precipitação	-0.81*	-0.91**	0.62 ^{ns}	-0.88**	-0.69 ^{ns}	-0.64 ^{ns}	0.61 ^{ns}	-0.91**	—							
VV	0.44 ^{ns}	0.36 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.28 ^{ns}	0.20 ^{ns}	0.54 ^{ns}	-0.52 ^{ns}	0.36 ^{ns}	-0.44 ^{ns}	—						
θ _{us}	-0.86**	-0.66 ^{ns}	-0.17 ^{ns}	-0.70 ^{ns}	-0.57 ^{ns}	-0.22 ^{ns}	0.34 ^{ns}	-0.66 ^{ns}	0.60 ^{ns}	-0.69 ^{ns}	—					
ET (Limão)	0.85**	0.97***	-0.65 ^{ns}	0.95***	0.67 ^{ns}	0.56 ^{ns}	-0.49 ^{ns}	0.97***	-0.88**	0.25	-0.54 ^{ns}	—				
ET (Laranja)	0.78*	0.94***	-0.73*	0.91**	0.61 ^{ns}	0.57 ^{ns}	-0.48 ^{ns}	0.94***	-0.87**	0.16 ^{ns}	-0.43 ^{ns}	0.98***	—			
Ts	0.43 ^{ns}	0.35 ^{ns}	0.08 ^{ns}	0.28 ^{ns}	0.34 ^{ns}	0.44 ^{ns}	-0.58 ^{ns}	0.35 ^{ns}	-0.25 ^{ns}	0.43 ^{ns}	-0.45 ^{ns}	0.21 ^{ns}	0.11 ^{ns}	—		
NDVI	-0.85**	-0.81*	0.26 ^{ns}	-0.83**	-0.63 ^{ns}	-0.36 ^{ns}	0.35 ^{ns}	-0.81*	0.84**	-0.58 ^{ns}	0.83*	-0.78*	-0.73*	-0.06 ^{ns}	—	
Albedo	0.00 ^{ns}	0.06 ^{ns}	-0.21 ^{ns}	0.20 ^{ns}	0.26 ^{ns}	-0.41 ^{ns}	0.49 ^{ns}	0.06 ^{ns}	-0.13 ^{ns}	-0.48 ^{ns}	0.14 ^{ns}	0.21 ^{ns}	0.28 ^{ns}	-0.78*	-0.26 ^{ns}	—

Nota. * p < .05, ** p < .01, *** p < .001,

5.3 Validação do algoritmo SAFER

Na Figura 20, estão apresentadas a estimativa ET_{SAFER} (mm d^{-1}) e a ET_C (mm d^{-1}), com vistas a validar a estimativa da ET pelo SAFER, a qual foi estimada com base nos dados de campo obtidos da estação automática meteorológica e dados de coleta de solo para determinar o conteúdo hídrico do solo.

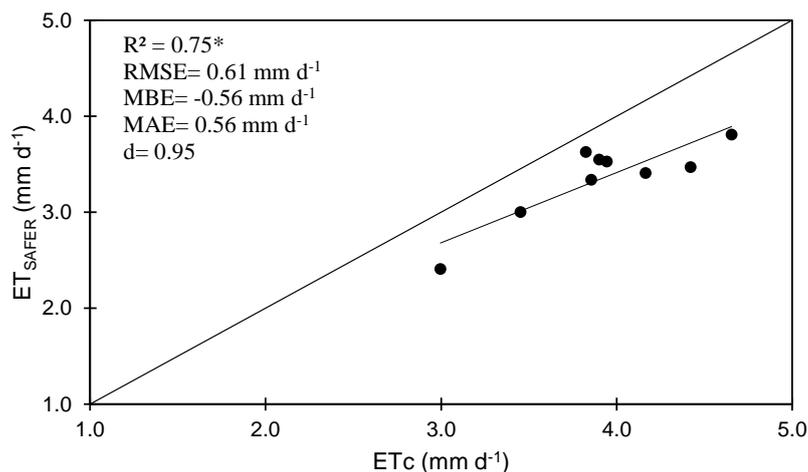


Figura 20 Comparação entre a evapotranspiração diária da laranja estimada pelo algoritmo SAFER (ET_{SAFER} , mm d^{-1}) e evapotranspiração da cultura (ET_C , mm d^{-1}) em área total selecionada na safra de 2021 (**Indica regressão significativa a $p < 0,05$).

Em geral, considerando o resultado obtido, a análise de regressão foi adequada, apresentando $R^2 = 0,75$, raiz quadrada do erro médio = $0,61 \text{ mm d}^{-1}$, erro de polarização média = $-0,56 \text{ mm d}^{-1}$ e erro absoluto médio = $0,56 \text{ mm d}^{-1}$. Nesse sentido, os parâmetros estatísticos validam que o modelo apresentou um erro inferior a 1 mm (Figura 20). Resultados próximos foram obtidos para os citros por Vanella *et al.* (2019), em que utilizaram o método tomografia de resistividade elétrica (ERT) para a estimativa da ET nas culturas dos citros na região Sul da Itália, e observaram valor de $R^2 = 0,62$, raiz quadrada do erro médio = $1,17 \text{ mm d}^{-1}$, e uma evapotranspiração média $3,46 \text{ mm d}^{-1}$, aplicando o SEBAL na região leste da Espanha, com R^2 de 0,67 (JIMÉNEZ-BELLO, 2015).

A Figura 21 apresenta, separadamente, a comparação entre a ET_{SAFER} (mm d^{-1}) e ET_C (mm d^{-1}) para as culturas do limão e da laranja, evidenciando diferenças quanto aos resultados observados para a área inteira (Figura 20).

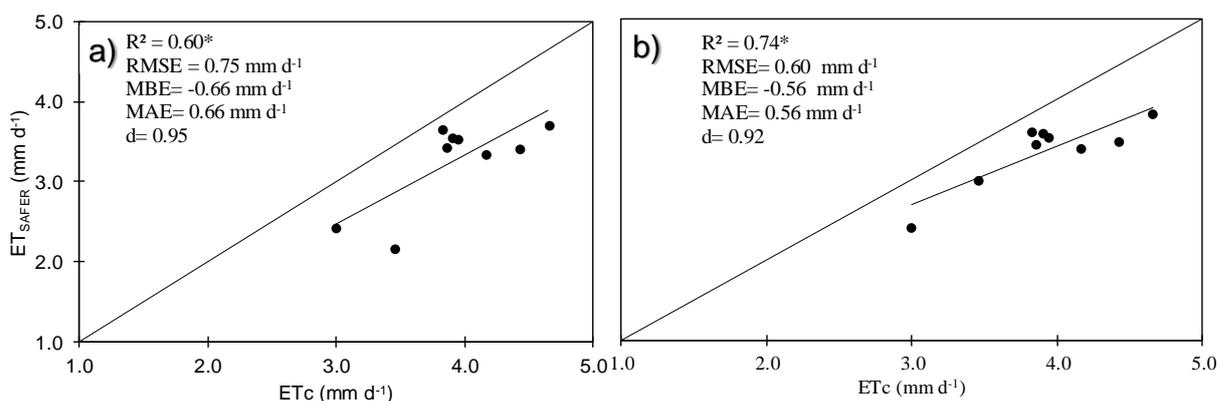


Figura 101 Comparação entre a evapotranspiração real diária estimada pelo algoritmo SAFER (ET_{SAFER} , mm d^{-1}) e evapotranspiração da cultura (ET_c , mm d^{-1}) para o cultivo da laranja (a) e limão (b) na safra de 2021. (**Indica regressão significativa a $p < 0.05$).

Observa-se que as comparações, quando realizadas separadamente para as culturas, apresentaram resultados distintos, de modo que a cultura do limão dispôs melhor desempenho ($R^2 = 0,74$), e valores significativos de RMSE, MBE e MAE maiores que $0,56 \text{ mm d}^{-1}$ (Figura 21). Resultados com a cultura do feijão na região oeste da Bahia indicaram dados similares ao correlacionar a ET obtida pelo algoritmo SAFER e o modelo da FAO 56 (Penman-Monteith), em que verificaram $R^2 = 0,73$, evidenciando o potencial desse algoritmo no auxílio para determinar a necessidade hídrica da cultura (LIMA *et al.*, 2019).

Do mesmo modo, Almeida e Maia (2021) estimaram a ET da cultura do açaí por meio do SAFER e constataram concordância ao observarem $R^2 = 0,99$, $RMSE = 0,04 \text{ mm dia}^{-1}$ e $MBE = 0,05 \text{ mm dia}^{-1}$. Assim, concluíram que a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto por meio do balanço de energia, associada ao modelo agrometeorológico SAFER, pode ser utilizada para a estimativa da ET do açaí, por apresentar forte relação ao método padrão FAO56 na área de estudo.

Não obstante, Teixeira *et al.* (2017), ao utilizarem o algoritmo SAFER com imagens do satélite Landsat 8, em conjunto com dados climáticas do limoeiro sob diferentes métodos de irrigação, concluíram que esse algoritmo demonstrou forte sensibilidade na detecção das condições hídricas e de vegetação da região. Logo, constataram que a utilização do sensoriamento remoto por meio do emprego do algoritmo SAFER possibilita a economia de água no manejo da irrigação e, conseqüentemente, proporciona a manutenção da produtividade da cultura do limão.

6 CONCLUSÕES

Esta pesquisa apresentou limitações na aplicação do sensoriamento remoto orbital devido às condições climáticas não favorecerem o fornecimento de imagens de forma constante em relação à incidência de nuvens, o que dificultou a obtenção de mais imagens de satélite. Porém, não deixa de encorajar trabalhos futuros no que se refere à aplicação de VANTs como uma forma de realizar a estimativa de ET com maior frequência de dados. Esse posicionamento é elucidado pelos resultados promissores observados para maior nessa região citrícola do Norte do país, de maneira que podemos pontuar que:

- As imagens dos satélites Landsat 7 e 8 podem ser usadas para cálculo da ET via algoritmo SAFER, pois ofereceram informações preciosas que ajudaram o algoritmo a estimar a variável com precisão para o período estudado. Os valores encontrados via algoritmo (ET_{SAFER}) apresentaram conformidade com os dados observados (ET_C) com precisão de 75%;
- A estimativa de ET para o limoeiro apresentou melhor desempenho com 74%, enquanto a área cultivada com laranja obteve precisão de 60%;
- A metodologia aplicada confirmou ser de mais simples aplicação quando comparada a outros algoritmos e com menor custo de execução, tornando-se mais viável financeiramente. Nesse sentido, as respostas encontradas de estimativa da ET via SAFER para as culturas do limão e da laranja no município de Capitão poço – PA foram satisfatórias, além de deixar evidenciado o grande potencial que a ferramenta possui para agregar no desenvolvimento agrícola da região;
- O NDVI comprovou o desenvolvimento da cultura e suas interferências pelas condições climáticas; Observando que nos meses mais quentes, foram apresentados os menores NDVIs para ambas as culturas.

7 REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA DE DEFESA AGROPECUÁRIA DO ESTADO DO PARÁ - ADEPARÁ. **Boletim Informativo Produção Vegetal**, [S.l.], v.1, n.1, p.1-10, 2020. Disponível em: <http://www.adepara.pa.gov.br/>. Acesso em: 20 ago. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Atlas Irrigação: Uso da água na agricultura irrigada**. 2. ed. Brasília: ANA, 2021.
- ALENCAR, L. P.; SEDIYAMA, G. C.; MANTOVANI, E. Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o Padrão FAO), para Minas Gerais, na ausência de alguns dados climáticos. **Engenharia Agrícola**, [s.l.], v. 35, n. 1, p. 39-50, 2015.
- ALLEN, R. G. *et al.* SEBAL (surface energy balance algorithms for land). **Advance training and users manual–Idaho implementation**, version, v. 1, p. 97, 2002. Disponível em: <https://www.posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2016/09/MET-479-Waters-et-al-SEBAL.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2023.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage Paper**, [s.l.], v. 56. p. 275-300, 1998.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) – Applications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [s.l.], v. 133, n. 8, p. 395-406, 2007.
- ALMEIDA, F. A.; MAIA, G. S. **Estimativa de evapotranspiração e coeficiente de cultura do açai (*Euterpe oleracea* Mart.) utilizando o algoritmo SAFER**. Orientador: Jannaylton Éverton Oliveira Santos. 2021. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Tomé-Açu, 2021.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, M. J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Metereologische Zeitschrift**, [s.l.], v. 22, n. 711-728, 2013.
- ALVES, F. L. **Características físicas, químicas e físico-químicas de frutas de cultivares de limão *Citrus limom* (L.) Burm.** 1986. 201 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1986.
- AMENDOLA, E. C. **Temperatura de superfície e coeficientes de cultura dos citrus irrigados por diferentes sistemas**. 2018. 51 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2018.
- AMORIM, M. C. C.; DUBREUIL, V.; QUENOL, H.; SANT'ANA NETO, J. L. Características das ilhas de calor em cidades de porte médio via sensoriamento remoto: exemplos de Presidente Prudente (Brasil) e Rennes (França). **Confins**, [s.l.], n. 7, p. 1-16, 2009.
- ANDRADE, R. G.; LIMA, E. P.; TEIXEIRA, A. H. C.; LEIVAS, J. F.; VICTORIA, D. C.; FACCO, A. G. Mapeamento espaço-temporal da evapotranspiração na bacia do rio Paracatu utilizando imagens MODIS e o algoritmo SAFER. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, [s.l.], v. 3, n. 3, p. 1729-1739, 2020.
- ANDRADE, R. G.; TEIXEIRA, A. H. C.; SANO, E. E.; LEIVAS, J. F.; VICTORIA, D. C.; NOGUEIRA, S. F. Pasture evapotranspiration as indicators of degradation in the Brazilian Savanna: A case study for Alto Tocantins watershed. *In*: SPIE REMOTE SENSING

SYMPOSIUM, 16, 2014, Amsterdam. **Anais**. Amsterdam: CNPM, 2014, p. 92391Z-1-92391Z-7.

BARBOZA JÚNIOR, C. R. A.; FOLEGATTI, M. V.; ROCHA, F. J.; ATARASSI, R. T. Coeficiente de cultura da lima-ácida Tahiti no outono-inverno determinado por lisimetria de pesagem em Piracicaba – SP. **Engenharia Agrícola**, [s.l.], v. 28, n. 4, p. 691-698, 2008.

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

BEZERRA, J. M. **Estimativa da evapotranspiração real para área de caatinga utilizando Sebal**. Orientador: Geber Barbosa de Albuquerque Moura. 2013. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Água e Solo) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2013.

BUSTAN, A.; GOLDSCHMIDT, E. E. Estimating the cost of flowering in a grapefruit tree. **Plant, Cell & Environment**, [s.l.], v. 21, n. 2, p. 217-224, 1998.

CAPUTO, M. M. **Avaliação de doze cultivares de laranja doce de maturação precoce na região sudoeste do Estado de São Paulo**. Orientador: Francisco de Assis Alves Mourão Filho. 2012. 86 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Ciências, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2012.

CARVALHO, A. L.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; PORFIRIO, A. C. S. Ocorrência de períodos secos na região de Rio Largo, Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s.l.], v. 28, p.173-180, 2013.

CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; NETO, P. C. Evapotranspiração de referência: Uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesq. Agropec. Trop.**, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 456-465, jul./set. 2011.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA – CEPEA/ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA LUIZ DE QUEIROZ – ESALQ; CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL – CNA. **PIB do agronegócio brasileiro**. 2022. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>. Acesso em: 26 out. 2022.

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**, [s.l.], v. 113, p. 893-903, 2009.

COELHO, E. F.; COELHO FILHO, M. A.; SIMÕES, W. L.; COELHO, Y. S. Irrigação em citrus nas condições do Nordeste do Brasil. **Citrus Research & Technology**, [s.l.], v. 27, n. 2, p. 297-320, 2006.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Análise mensal da laranja**. Brasília: CONAB, 2020. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>. Acesso em: 26 out. 2022.

CUNHA, A. C.; GABRIEL FILHO, L. R. A.; TANAKA, A. A.; GOES, B. C.; PUTTI, F. F. Influence of the estimated global solar radiation on the reference evapotranspiration obtained through the Penman-Monteith FAO 56 method. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 243, p. 235-248, 2021.

DIANA, E. H. L.; ISIDORO, C. P. F.; IKEFUTI, C. V. O agronegócio e a produtividade do limão Tahiti: Um estudo no município de Marinópolis, no Noroeste Paulista. **Brazilian Journals of Business**, [s.l.], v. 3, n. 4, p. 3208-3219, 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema de produção vegetal**. Brasília: EMBRAPA, 2015. Disponível em: <http://www.embrapa.br/ProducaoVegetal>. Acesso em: 13 jan. 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema de produção dos citrus**. Brasília: Embrapa, 2019. Disponível em: <https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Citrus/CitrusNEPequenosProdutores/importancia.htm>. Acesso em: 20 fev. 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistemas de produção para pequenos produtores de citrus do Nordeste**. Brasília: Embrapa, 2005. Disponível em: <https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Citrus/CitrusNEPequenosProdutores/irrigacao.htm#:~:text=Necessidades%20H%C3%ADdricas&text=O%20consumo%20anual%20de%20%C3%A1gua,de%20600%20a%201200%20mm>. Acesso em: 26 out. 2022.

FAEPA – FEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO PARÁ. **Boletim Agropecuário**. Belém: FAEPA, 2019. Disponível em: <http://sistemafaepa.com.br/faepa/agronegocio-paraense>. Acesso em: 14 abr. 2021.

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. **Hydrological Processes**, [s.l.], v. 15, n. 9, p. 1585-1607, 2001.

FEITOSA, D. G.; HERNANDEZ, F. B. T.; FRANCO, R. A. M.; TEIXEIRA, A. H. C.; NEALE, C. M. Energy balance in the watershed of Ipê, Northwestern São Paulo State, Brazil. In: SPIE REMOTE SENSING, 2016, Edinburgh. **Anais**. Edinburgh: SPIE, 2016.

FERREIRA JÚNIOR, J. J.; DANTAS, M. J. F. Análise do albedo da superfície e de índices de vegetação por sensoriamento remoto na bacia hidrográfica do Rio Pacoti/CE. **Revista Tecnológica**, [s.l.], v. 39, p. 1-18, 2018.

FERREIRA, R. V.; BASTIANEL, M.; AZEVEDO, F. A.; NEGRI, J. D. Desenvolvimento vegetativo e características físico-químicas dos frutos de quatorze genótipos de limão. **Citrus Research & Technology**, [s.l.], v. 39, p. 1-9, 2018.

FERREIRA, V. M.; KLAR, A. E.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; OLIVEIRA, S. R. M. Evapotranspiração e coeficiente de cultura da melancia na microrregião de Teresina, PI, Brasil. **Comunicata Scientiae**, [s.l.], v. 6, n. 4, p. 488-494, 2015.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATION – FAO. **Citrus fruit – Fresh and Processed – Annual Statistics**. 2020. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL/visualize>. Acesso em: 26 out. 2022.

FUNDO DE DEFESA DA CITRICULTURA – FUNDECITRUS. **Inventário de árvores e estimativa da sara de laranja 2018/19 do cinturão agrícola de São Paulo e Triângulo/Sudoeste Mineiro**. Araraquara: Fundecitrus, 2018.

FURQUIM, L. C.; NUÑEZ, D. N. C.; SOUZA, E. J.; SANTINI, J. M. K.; CABRAL, J. S. R.; STONE, L. F. Estimativa da evapotranspiração em sistemas integrados no cerrado, utilizando o algoritmo SAFER. **Irriga**, [s.l.], v. 25, n. 3, p. 617-628, 2020.

GAIA, C. D. C. **A evapotranspiração no estado do Pará: definição de déficits hídricos, utilização do sensoriamento remoto e da geoestatística.** Orientador: Enzo Dal Pai. 2021. 75 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2021.

GOMIS-CEBOLLA, J.; JIMENEZ, J. C.; SOBRINO, J. A.; CORBARI, C.; MANCINI, M. Intercomparison of remote sensing-based evapotranspiration algorithms over Amazonian forests. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, [s.l.], v. 80, p. 280-294, 2019.

GLENN, D. M.; TABB, A. Evaluation of five methods to measure normalized difference vegetation index (NDVI) in apple and citrus. **International Journal of Fruit Science**, [s.l.], v. 19, n. 2, p. 191-210, 2019.

HANSEN, M. C.; POTAPOV, P. V.; MOORE, R.; HANCHER, M.; TURUBANOVA, S. A.; TYUKAVINA, A.; THAU, D.; STEHMAN, S. V.; GOETZ, S. J.; LOVELAND, T. R.; KOMMAREDDY, A.; EGOROV, A.; CHINI, L.; JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. **Science**, [s.l.], v. 342, n. 6160, p. 850-853, 2013.

HERIBERTO, A.; TEIXEIRA, C.; BRAZ, F.; HERNANDEZ, T.; LOPES, H. L.; SCHERER-WARREN, M.; BASSOI, L. H. A comparative study of techniques for modeling the spatiotemporal distribution of heat and moisture fluxes at different agroecosystems in Brazil. *In*: PETROPOULOS, G. G. (Ed.). **Remote Sensing of energy fluxes and soil moisture content**. Boca Raton: CRC Group, 2014. p. 165-185.

IGLESIAS, D. J., CERCÓS, M., COLMENERO-FLORES, J. M., NARANJO, M. A., RÍOS, G., CARRERA, E., & TALON, M. Physiology of citrus fruiting. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, [s.l.], v 19, p. 333-362, 2007.

INFORMATIVO CENTRO DE CITRICULTURA. **Lima ácida Tahiti no Centro de Citricultura: pesquisas e difusão de tecnologia.** 2021. Disponível em: https://ccsm.br/wp-content/uploads/2021/04/INFORMATIVO_CCASM_01-02-03_2021.pdf. Acesso em: 26 out. 2022.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Monitoramento da Amazônia.** 2017. Disponível em: http://www.inpe.br/dados_abertos/. Acesso em: 07 mar. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Economia e produção agrícola.** 2020. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualiza%C3%A7%C3%A3o/periodicos%20/66/pam_2020_v45_br_informativo. Acesso em: 17 out. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produção de laranja.** 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/laranja/pa>. Acesso em: 11 out. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produção agrícola municipal – SIDRA.** 2019. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457#resultado>. Acesso em: 10 out. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produção Agrícola Municipal (PAM).** 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=destaques>. Acesso em: 11 out. 2022.

JIMÉNEZ-BELLO, M. Á., CASTEL, J. R., TESTI, L., & INTRIGLIOLO, D. S. Assessment of a remote sensing energy balance methodology (SEBAL) using different interpolation methods to determine evapotranspiration in a citrus orchard. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, [s.l.], v. 8, n. 4, p. 1465-1477, 2015.

LEIVAS, J. F.; TEIXEIRA, A. H. DE C.; MIRANDA, F. R. de; TAKEMURA, C. M.; GARCON, E. A. M.; Imagens sentinela para obtenção de parâmetros agrometeorológicos espectrais, em áreas de cultivo de coqueiro anão. In: XXXVIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRÁFIA FÍSICA APLICADA, 18, 2019, Fortaleza-Ceará. **Anais [...]** XVIII SBGFA. p. 01-10. 2019.

LIMA, A. L. B.; FILGUEIRAS, R.; MANTOVANI, E. C.; ALTHOFF, D.; SANTOS, R. A.; VENANCIO, L. P. Biophysical parameters and actual evapotranspiration of bean culture by means of remote sensing. **Journal of Agricultural Science**, [s.l.], v. 11, n. 13, p. 156-166, 2019.

LORENZI, H.; BACHER, L.; LACERDA, M.; SARTORI, S. **Frutas brasileiras e exóticas cultivadas: de consumo *in natura***. São Paulo: Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2006. 672 p.

MACEDO, O. W. A. O. **Avaliação da cadeia produtiva da laranja (*Citrus sinensis* L. Osbec) nos municípios de Iranduba, Manacapuru, Manaus e Rio Preto da Eva no estado do Amazonas**. Orientador: Suely de Souza Costa. 2014. 140 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura no Trópico Úmido) – Programa em Agricultura no Trópico Úmido do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2014.

MATOS, RC de M.; CANDEIAS, A. L. B.; TAVARES-JUNIOR, J. R. Mapeamento da vegetação, temperatura e albedo da Bacia Hidrográfica do Pajeú com imagens MODIS. **Revista Brasileira de Cartografia**, [s.l.], v. 65, n. 1, p. 139-160, 2013.

MORAES, B. C.; COSTA, J. M. N.; COSTA, A. C. L.; COSTA, M. H. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 35, n. 2, p. 207-214, 2005.

MORAES, J. G.; MARCIANO, C. R.; AMARAL, C. O.; SOUSA, E. F.; MARINHO, C. S. Balanço hídrico e coeficiente de cultura da laranjeira 'Folha Murcha' no Noroeste Fluminense. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 46, n. 2, p. 241-249, 2015.

MORETI, D.; LIBARDI, P. L.; ROCHA, G. C.; LOVATTI, M. J.; AGUIAR, L. I. G. Avaliação espaço-temporal das armazenagens gravimétricas e volumétricas da água num Latossolo com citros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.1281-1290, 2007.

MUSSI, R. F. M. *et al.* Evapotranspiração da cana-de-açúcar estimada pelo algoritmo SAFER. **Irriga**, [s.l.], v. 25, n. 2, p. 263-278, 2020.

NEVES, M. F.; TROMBIN, V. G.; MILAM, P.; LOPES, F. F.; CRESSONI, F.; KALAKI, R. **O retrato da citricultura brasileira**. 1. ed. São Paulo: CitrusBR, 2010.

NOVO, E. M. L.; PONZONI, F. J. **Introdução ao sensoriamento remoto**. 2001. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=3175598>. Acesso em: 07 jun. 2021.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of Royal Society of London. **Série A**, London, v. 193, p. 120-145, 1948.

PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G.; SMITH, M.; RAES, D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 147, p. 4-20, 2015.

PEREZ, O. C.; DOS SANTOS, V. H. A.; Exportação de suco de laranja Brasileiro. **Revista de Administração da UNIFATEA**, [s.l.], v. 9, n. 9, p. 101-109, 2015.

PINHO SOUSA, D.; FRARE, J. C. V.; FARIAS, V. D. S.; NUNES, H. G. G. C.; MARTINS, M. S.; LIMA, A. F. T.; TAVARES, L. B.; COSTA, D. L. P.; LIMA, M. J. A.; CARVALHO, C. J. R.; PONTE, P. J. O. Acai palm base temperatures and thermal time requirements in eastern Amazon. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v. 57, e01667, 2022.

PIO, R. M.; LARANJEIRA, F. F.; GARCIA, V. X. P. Comportamento de quatorze porta-enxertos para limão Eureka km 47 na região de Araraquara – SP. **Revista Brasileira de Fruticultura**, [s.l.], v. 27, n. 1, p. 73-76, 2005.

PIRES, R. C. M.; CONCEIÇÃO, M. A. F.; COELHO FILHO, M. A. Irrigação de frutíferas subtropicais (citricultura e viticultura). *In*: PAOLINELLI, A.; DOURADO NETO, D.; MANTOVANI, E. C. **Diferentes abordagens sobre a agricultura irrigada no Brasil: Técnica e Cultura**. Piracicaba: Esalq – USP, 2021. p. 461-497.

PREVIDELI, F. D.; ALMEIDA, M. M. Y. O mercado “in natura” do limão Tahiti. **Interface Tecnológica**, [s.l.], v. 17, n. 1, p. 409-416, 2020.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. 2021.

RISSATO, A. B.; COQUEIRO, M.; SANTANA, N.; ALVARES, V. Exportação de suco de laranja concentrado brasileiro. *In*: IV SIMPÓSIO SUL-MATO-GROSSENSE DE ADMINISTRAÇÃO, 2021, PARANAÍBA. **Anais**. Paranaíba: Universidade Federal do Mato de Mato Grosso do Sul, 2021. p. 715-724.

SAFRE, A. L. S.; NASSAR, A.; TORRES-RUA, A.; ABOUTALEBI, M.; SAAD, J. C. C.; MANZIONE, R. L.; TEIXEIRA, A. H. C.; MCKEE, L. G.; ALFIERI, J. G.; HIPPS, L. E.; NIETO, H.; WHITE, W. A.; DEL MAR ALSINA, M.; SANCHEZ, L.; KUSTAS, W. P.; DOKOOZLIAN, N.; GAO, F.; ANDERSON, M. C. Performance of Sentinel-2 SAFER ET model for daily and seasonal estimation of grapevine water consumption. **Irrigation Science**, [s.l.], v. 40, n. 4-5, p. 635-654, 2020.

SALES, D. L.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P.; SOUZA, J. M. F. Estimativa de evapotranspiração e coeficiente de cultura do tomateiro industrial utilizando o algoritmo SAFER. **Irriga**, [s.l.], v. 22, n. 3, 2017.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5.ed. Brasília: Embrapa, 2018.

Santos, J. E. O., da Cunha, F. F., Filgueiras, R., da Silva, G. H., de Castro Teixeira, A. H., dos Santos Silva, F. C., & Sedyama, G. C. Performance of SAFER evapotranspiration using missing meteorological data. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 233, p. 106076, 2020.

SANTOS, R. A.; DIVINVULA, J. S.; OLIVEIRA, K. R.; VENANCIO, L. P.; MISSIO, M. F.; FILGUEIRAS, R.; CUNHA, F. F.; ALEMAN, C. C. Remote sensing as a tool to determine biophysical parameters of irrigated seed corn crop. **Semina**, [s.l.], v. 41, n. 2, 2020.

SCHWARTZ, G. Manejo sustentável de florestas secundárias: espécies potenciais no Nordeste do Pará, Brasil. **Amazônia: Ciência & Desenvolvimento**, Pará, v. 3, n. 5, p. 125-147, 2007.

SENAY, G. B.; FRIEDRICH, M.; SINGH, R. K.; VELPURI, N. M. Evaluating Landsat 8 evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River Basin. **Remote Sensing of Environment**, [s.l.], v. 185, p. 171-185, 2016.

SILVA, B. B.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C.; OLIVEIRA, L. M. M.; 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**, [s.l.], v. 9, n. 47, p. 1218-1226, 2012.

SILVA, C. O. F.; MANZIONE, R. L.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L. Comparison of SAFER and METRIC-based actual evapotranspiration models in a subtropical area of Brazil. **Irriga**, [s.l.], v. 1, n. 1, p. 48-55, 2019.

SILVA, C. O. F.; MANZIONE, R. L.; TEIXEIRA, A. H. C. Modelagem espacial da evapotranspiração e balanço de energia superficial em Petrolina e Juazeiro com imagens do satélite sentinel-2. In: XIV SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 14, 2018, Maceió - AL. **Anais** [...]. XIV SRHNE. p. 1-9. 2018.

SILVA, L. K. **Produtividade e qualidade de frutos de laranja pêra-IAC fertirrigada com déficit hídrico**. Orientador: Regina Célia de Matos Pires. 2019. 61 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical, Instituto Agronômico, Campinas, 2019.

SILVA, R. R. S. **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 em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2020.

SILVA, Y. F. **Evapotranspiração na cultura de citrus no noroeste paulista**. 2014. 49 f. Monografia (Graduação em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Ilha Solteira, 2014.

SILVA, Y. F. **Uso do algoritmo SAFER para evapotranspiração real na cultura da soja**. 2018. 73 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2018.

SILVEIRA, C. S.; SOUZA, J. L.; MAIA JUNIOR, J. V. F.; ARAÚJO, B. A. M.; ALMEIDA, F. A. F.; STUDART, T. M. C.; LUNA, R. M. Análise espacial da evapotranspiração no estado do Ceará: análise comparativa entre métodos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19, 2011, Maceió. **Anais**. Maceió: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2011.

SILVEIRA, L. K. **Produtividade e qualidade de frutos de laranja Pêra-IAC fertirrigada com déficit hídrico**. Orientador: Regina Célia de Matos Pires. 2019. 51 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical, Instituto Agronômico, Campinas, 2019.

SIMÃO, A. H.; MATOS, A. P.; VASCONCELOS, J. A. R.; QUEIROZ, G. B.; RAMAIO, K. A. Estimativa da demanda hídrica e manejo da irrigação na cultura do abacaxi no município de Conceição do Araguaia, Estado do Pará. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DA CULTURA DO ABACAXI, 6, 2015, Conceição do Araguaia. **Anais**. Belém: SEDAP, 2015.

SMITH, M. **Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements**. Roma: FAO, 1991.

SOUZA, S. A. **Avaliação do potencial de aumento de produtividade e economia de água e energia na irrigação de precisão**. Orientador: Lineu Neiva Rodrigues. 2021. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2021.

STATSOFT INC. **Statistica**: data analysis software system. 2011.

STEDUTO, P.; TODOROVIC, M.; CALIANDRO, A.; RUBINO, P. Daily reference evapotranspiration estimates by the Penman-Monteith equation in Southern Italy: constant vs. variable canopy resistance. **Theoretical and Applied Climatology**, [s.l.], v. 74, p. 217-225, 2003.

SWINGLE, W. T.; REECE, P. C. The botany of citrus and its wild relatives. *In*: REUTHER, W.; WEBBER, H. J.; BATCHELOR, L. D. (Ed.). **The citrus industry**. Riverside: Universidade da Califórnia, 1967. p. 190-430.

TEIXEIRA, A. H. C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing and Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, [s.l.], v. 2, n. 5, p. 237-247, 2010.

TEIXEIRA, A. H. C.; LEIVAS, J. F.; SILVA, G. B. Options for using Landsat and RapidEye satellite images aiming the water productivity assessments in mixed agro-ecosystems. **Proceedings of SPIE**, [s.l.], v. 9998, p. 99980A-1-99980A-11, 2016.

TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; AHMAD, N. D.; MOURA, M. S. B.; BOS, M. G. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v. 362, n. 1-2, p. 110-127, 2008.

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNÁNDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L.; SCHERER-WARREN, M.; BASSOI, L. H. **Modelagem espaçotemporal dos componentes dos balanços de energia e de água no semiárido brasileiro**. Campinas: Embrapa Territorial, 2013.

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNÁNDEZ, F. B. T.; LEIVAS, J. F.; NUÑEZ, D. N. C.; MOMESSO, R. F. A. Surface temperature estimated with Landsat 8 images and geostatistical tools in the northwestern São Paulo state. **Proceedings of SPIE**, [s.l.], v. 10421, p. 104210F-1-104210F-9, 2017.

TEIXEIRA, A. H. C. Modelling evapotranspiration by remote sensing parameters and agrometeorological stations. **Remote Sensing and Hydrology**. Wyoming: IAHS, 2012.

TEIXEIRA, A.; LEIVAS, J.; TAKEMURA, C.; BAYMA, G.; GARÇON, E.; SOUSA, E.; FARIAS, F.; SILVA, C. Monitoring environmental indicators by coupling remote sensing and weather data: applications to the Brazilian biomes. **Research Square**, [s.l.], v. 1, p. 1-35, 2022.

TEIXEIRA, A.; LEIVAS, J.; STRUIVING, T.; REIS, J.; SIMÃO, F. Energy balance and irrigation performance assessments in lemon orchards by applying the SAFER algorithm to Landsat 8 images. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 247, p. 1-19, 2021.

THORNTHWAITE, C. W. Na approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, [s.l.], v5, n.4, p. 55-94, 1948.

TITO, T. M. **Estimativas de evapotranspiração através de sensoriamento remoto e métodos empíricos para o estado do Rio de Janeiro e Parque Nacional do Itatiaia**. Orientador: Rafael Coll Delgado. 2019. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2021.

USGS. **Science for a changing world**. 2021. Disponível em: <https://www.usgs.gov/>. Acesso em: 24 jan. 2021.

VENANCIO, L. P.; MANTOVANI, E. C.; AMARAL, C. H.; NEALE, C. M. U.; FIGUEIRAS, R.; GONÇALVES, I. Z.; CUNHA, F. F. Evapotranspiration mapping of commercial corn fields in Brazil using SAFER algorithm. **Scientia Agricola**, [s.l.], v. 78, n. 7, p. 1-12, 2021.

VANELLA, D., RAMÍREZ-CUESTA, J. M., INTRIGLIOLO, D. S., & CONSOLI, S. Combining electrical resistivity tomography and satellite images for improving evapotranspiration estimates of citrus orchards. **Remote Sensing**, [s.l.], v. 11, n. 4, p. 373, 2019.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R. O'DONELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, [s.l.], v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

ZWART, S. J.; BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL for detecting spatial variation of water productivity and scope for improvement in eight irrigated wheat systems. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 89, p. 287-296, 2007.