



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/09.22.13.31-TDI

ESTIMATIVA DO USO DA ÁGUA EM CULTURAS AGRÍCOLAS IRRIGADAS POR PIVÔ CENTRAL

Marionei Fomaca de Sousa Júnior

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. Leila Maria Garcia
Fonseca, e Hugo do Nascimento
Bendini, aprovada em 17 de agosto
de 2022.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/47LRMB8>>

INPE
São José dos Campos
2022

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/09.22.13.31-TDI

ESTIMATIVA DO USO DA ÁGUA EM CULTURAS AGRÍCOLAS IRRIGADAS POR PIVÔ CENTRAL

Marionei Fomaca de Sousa Júnior

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. Leila Maria Garcia
Fonseca, e Hugo do Nascimento
Bendini, aprovada em 17 de agosto
de 2022.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/47LRMB8>>

INPE
São José dos Campos
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Sousa Júnior, Marionei Fomaca de.
So85e Estimativa do uso da água em culturas agrícolas irrigadas por pivô central / Marionei Fomaca de Sousa Júnior. – São José dos Campos : INPE, 2022.
xxi + 61 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/09.22.13.31-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2022.

Orientadores : Drs. Leila Maria Garcia Fonseca, e Hugo do Nascimento Bendini.

1. Recursos hídricos. 2. Sensoriamento remoto. 3. Uso da água. 4. Irrigação. 5. Segurança Hídrica. I.Título.

CDU 528.8:631.67



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
Secretaria de Pós-Graduação - SEPGR

DEFESA FINAL DE DISSERTAÇÃO DE MARIONEI FOMACA DE SOUSA JUNIOR
BANCA Nº 213/2022, REG 95244/2020

No dia 17 de agosto de 2022, às 09:30h, por teleconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Sensoriamento Remoto. O trabalho precisa da incorporação das correções sugeridas pela Banca Examinadora e revisão final pelo(s) orientador(es).

Título: “ESTIMATIVA DO USO DA ÁGUA EM CULTURAS AGRÍCOLAS IRRIGADAS POR PIVÔ CENTRAL”

Membros da banca:

Dr. Thales Sehn Körting – Presidente e Membro Interno – INPE

Dra. Leila Maria Garcia Fonseca – Orientadora – INPE

Dr. Hugo do Nascimento Bendini – Orientador – INPE

Dr. Marcos Adami – Membro Interno – INPE

Dr. Raian Vargas Maretto – Membro Externo – ITC-UT



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Adami, Pesquisador**, em 18/08/2022, às 16:14 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Raian Vargas maretto (E), Usuário Externo**, em 01/09/2022, às 06:23 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leila Maria Garcia Fonseca, Tecnologista**, em 08/09/2022, às 19:48 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Hugo do nascimento bendini (E), Usuário Externo**, em 19/09/2022, às 10:51 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Thales Sehn Korting, Pesquisador**, em 26/09/2022, às 15:30 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.mcti.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **10261300** e o código CRC **A7B41176**.

Referência: Processo nº 01340.006193/2022-38

SEI nº 10261300

“O temor do Senhor é o princípio da sabedoria...”

Provérbios 9:10

Ao meu pai e amigo Marionei Fomaca, que retornou ao seu lar e descansa em Cristo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me sustenta e ajuda em todos os dias da minha vida através de sua graça e misericórdia.

Aos meus orientadores Dra. Leila Maria Garcia Fonseca e Dr. Hugo do Nascimento Bendini por todo suporte, auxílio e conselhos, fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

A minha mãe (Ester) por todo carinho e amor e ao meu pai (Marionei), que não pôde acompanhar a realização deste sonho, mas que um dia irei reencontrá-lo nos céus e agradecer por todos os ensinamentos de vida. Aos meus irmãos (Jonathas e Evelyn) pela parceria e apoio.

A minha dupla de vida, Juliana, por estar ao meu lado em todo momento, seja ele de alegria ou tristeza, sempre me apoiando e incentivando com amor, paciência e cumplicidade. A minha nova família, que me recebeu de braços abertos com carinho.

Aos meus colegas inpeanos, Isa, Karol e Philipe, que mesmo distantes, se fizeram presentes no decorrer do mestrado.

Agradeço ao Departamento de Ciências Atmosféricas (IAG/USP) pela disponibilização dos dados de campo de evapotranspiração e ao Dr. Bruno Silva Oliveira por sanar diversas dúvidas no processamento desses dados. Por fim, agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro na forma de bolsa de estudos que permitiu a realização do presente trabalho.

RESUMO

A estimativa do uso da água utilizada por culturas agrícolas irrigadas é uma informação essencial para tomada de decisão no manejo dos recursos hídricos, sendo a evapotranspiração real (ETa) uma variável chave para esse processo. No Brasil, existem poucos trabalhos sobre estimativa do consumo hídrico na agricultura em grandes áreas, provavelmente, devido à falta de mapas de culturas agrícolas atualizados por safra, com boa acurácia e dificuldade de estimar ETa com bom desempenho em diferentes regiões do país. No entanto, o uso de séries temporais de imagens de média resolução espacial e o processamento em nuvem tem permitido a análise de grandes áreas de agricultura irrigada de forma mais eficiente. Dentro deste contexto, este trabalho visa estimar o volume de água utilizado por culturas irrigadas por pivôs centrais no município de Itobi no estado de São Paulo, utilizando séries temporais de ETa, geradas pelo modelo SSEBop-Br, e mapeamento de culturas agrícolas a partir de métricas fenológicas extraídas de séries temporais de índices de vegetação (IV) de imagens Landsat no ano agrícola de 2015/2016. Na estimativa da ETa, o modelo SSEBop-Br utiliza três fontes de dados meteorológicos: INMET, GLDAS e CFSv2. O volume de água foi estimado para cada uma destas fontes, relacionando o saldo de irrigação médio e a área total de cada cultura analisada no mapeamento. O mapeamento foi avaliado através do método Monte Carlo com 1000 repetições. Para a avaliação dos resultados, foi calculado o f1-score de cada classe do mapa de agricultura. A análise de todas as classes resultou um valor de f1-score acima de 0,9. A cultura que mais utilizou água na irrigação foi a batata (2 milhões de m³ pela fonte INMET e 1,3 milhões de m³ pela fonte CFSv2), seguida pelas culturas de soja (220 mil m³ pela CFSv2 e 800 mil m³ pela INMET), feijão (252 mil m³ pela CFSv2 e 333 mil m³ pela INMET), cenoura (52 mil m³ de água pela CFSv2 e 68 mil m³ pela INMET), cebola (37 mil m³ pela CFSv2 e 98 mil m³ pela INMET). O volume total de água utilizado pelos pivôs centrais no município de Itobi, durante o ano agrícola de 2015/2016, foi de 3,2 milhões m³ (INMET), 2,5 milhões m³ (GLDAS) e 1,8 milhões m³ (CFSv2). A estimativa de volume de água teve uma variação de até 72% para uma mesma cultura, dependendo da fonte de dados meteorológicos utilizada para cálculo da ETa.

Palavras-chave: Recursos hídricos. Sensoriamento Remoto. Uso da água. Irrigação. Segurança Hídrica. Landsat.

WATER USE ESTIMATE OF AGRICULTURAL CROPS IRRIGATED BY CENTRAL PIVOT

ABSTRACT

The estimation of the use of water used by irrigated agricultural crops is essential information for decision-making in the management of water resources, with actual evapotranspiration (ETa) being a key variable for this process. In Brazil, there are few studies on the estimation of water consumption in agriculture in large areas, probably due to the lack of maps of agricultural crops updated by harvest, with good accuracy and difficulty in estimating ETa with good performance in different regions of the country. However, the use of time series of medium spatial resolution images and cloud processing has allowed the analysis of large areas of irrigated agriculture more efficiently. Within this context, this work aims to estimate the volume of water used by crops irrigated by center pivots in the municipality of Itobi in the state of São Paulo, using time series of ETa, generated by the SSEBop-Br model, and mapping of agricultural crops from phenological metrics extracted from time series of vegetation indices (VI) from Landsat images in the 2015/2016 crop year. In estimating the ETa, the SSEBop-Br model uses three sources of meteorological data: INMET, GLDAS and CFSv2. The volume of water was estimated for each of these sources, relating the average irrigation balance and the total area of each culture analyzed in the mapping. The mapping was evaluated using the Monte Carlo method with 1000 repetitions. For the evaluation of the results, the f1-score of each class of the agriculture map was calculated. The analysis of all classes resulted in an f1-score above 0.9. The crop that most used water for irrigation was potato (2 million m³ by the INMET source and 1.3 million m³ by the CFSv2 source), followed by soybean crops (220,000 m³ by the CFSv2 and 800,000 m³ by the INMET), beans (252 thousand m³ by CFSv2 and 333 thousand m³ by INMET), carrots (52 thousand m³ of water by CFSv2 and 68 thousand m³ by INMET), onion (37 thousand m³ by CFSv2 and 98 thousand m³ by INMET). The total volume of water used by the central pivots in the municipality of Itobi, during the 2015/2016 agricultural year, was 3.2 million m³ (INMET), 2.5 million m³ (GLDAS) and 1.8 million m³ (CFSv2). The water volume estimate had a variation of up to 72% for the same crop, depending on the meteorological data sources used to calculate the Eta.

Keywords: Water resources. Remote sensing. Use of water. Irrigation. Water Security. Landsat.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Diagrama conceitual do modelo SSEBop-BR.	12
Figura 3.1 – Fluxograma geral da metodologia de estimativa do volume de água usada na agricultura irrigada.	13
Figura 3.2 – Mapa de localização da área de estudo.	14
Figura 3.3 – Localização da área de estudo com a sobreposição de cenas Landsat referentes às órbitas/ponto 220/75 e 2019/75 e localização das estações meteorológicas utilizadas no estudo.	15
Figura 3.4 – Fluxograma do mapeamento de culturas agrícolas nos pivôs centrais.	19
Figura 3.5 - Demonstração da matriz de confusão.	23
Figura 3.6 – Esquema da classificação automática dos pivôs centrais.....	24
Figura 4.1 – Comparação da evapotranspiração real estimada pelo modelo SSEBop-Br e observada em cada estação micrometeorológica.	28
Figura 4.2 – Comparação visual da evapotranspiração real estimada pelo modelo SSEbop-Br e observada em cada estação micrometeorológica.	29
Figura 4.3 – Perfil temporal da evapotranspiração real estimada pelo modelo SSEBop-Br e observada em estação micrometeorológica.	29
Figura 4.4 – Perfil temporal médio do EVI com seu respectivo desvio padrão para cada classe no ano agrícola 2015/16 baseado nos pixels das amostras coletadas em campo.	33
Figura 4.5– Área total das classes.	34
Figura 4.6 – Resultado da classificação para o município de Itobi- SP no ano agrícola 2015/16. Em destaque dois exemplos da classificação demonstrando a variabilidade das culturas dentro dos pivôs.	35
Figura 4.7 – Evapotranspiração, precipitação e saldo de irrigação acumulados médios e duração do primeiro ciclo das classes.....	36
Figura 4.8 – Evapotranspiração, precipitação e saldo de irrigação acumulados médios e duração do segundo ciclo das classes.	39
Figura 4.9 – Volume de água utilizado na irrigação por pivô central das culturas que necessitaram de suplementação hídrica no ano agrícola 2015/16 na área de estudo.	41

Figura 4.10 – Área e número de pivôs centrais no município de Itobi-SP no período de 2000 e 2019. 43

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 – Resumo dos dados utilizados no modelo SSEBop-Br.....	12
Tabela 3.1 – Descrição das amostras de culturas.	18
Tabela 3.2 – Descrição das métricas fenológicas.	21
Tabela 4.1 – Medidas de desempenho do modelo SSEBop-Br.	28
Tabela 4.2 – Desempenho do modelo SSEBop-BR em diferentes regiões.	31
Tabela 4.3 – Acurácia global e f1-scores obtidos em cada classe.	34

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AG	Acurácia Global
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
BR	Razão de <i>Bowen</i>
CONAB	<i>Companhia Nacional de Abastecimento</i>
ET	Evapotranspiração
ETa	Evapotranspiração real
EC	<i>Eddy Covariance</i>
ETP	Evapotranspiração Potencial
ET0	Evapotranspiração de Referência
EVI	<i>Enhanced Vegetation Index</i>
GEE	<i>Google Earth Engine</i>
H	Calor sensível
IVs	Índices de vegetação
LE	Calor latente
LSEB	<i>Land Surface Energy Balance</i>
METRIC	<i>Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration</i>
OLI	<i>Operational Land Imager</i>
OSEB	<i>One-Source Energy Balance</i>
SEBAL	<i>Surface Energy Balance Algorithm for Land</i>
SSEBop	<i>Operational Simplified Surface Energy Balance</i>
S-SEBI	<i>Surface Simplified Energy Balance Index</i>
TSEB	<i>Two-Source Energy Balance</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1 Evapotranspiração	4
2.2 Estimativa da variável ET	6
2.2.1 Métodos diretos e indiretos	6
2.2.2 Estimativa da ET por SR	7
2.2.2.1 Modelo SSEBop-Br.....	9
3 METODOLOGIA	13
3.1 Área de estudo.....	13
3.2 Obtenção de dados	15
3.2.1 Dados de sensoriamento remoto	15
3.2.2 Dados <i>in situ</i>	16
3.3 Mapeamento de cultivos.....	18
3.3.1 Processamento das séries temporais de EVI.....	19
3.3.2 Extração das métricas fenológicas e classificação de culturas	20
3.3.3 Classificação Random Forest e análise dos resultados	22
3.4 Evapotranspiração real (ETa).....	24
3.4.1 Processamento das séries temporais ETa.....	24
3.4.2 Análise de desempenho do modelo SSEBop-Br.....	25
3.5 Uso da água na irrigação	26
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1 Análise de desempenho do modelo SSEBop-Br.....	28
4.2 Classificação de cultura e obtenção da área plantada	32
4.3 Uso da água na irrigação	35
4.3.1 Primeiro ciclo agrícola.....	35
4.3.2 Segundo ciclo agrícola.....	38
4.3.3 Volume total de água utilizado	41
5 CONCLUSÕES.....	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

1 INTRODUÇÃO

De acordo com os levantamentos realizados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2021), a irrigação é responsável por cerca de 50% da captação de água de mananciais no Brasil. Estudos da ANA, em parceria com o Ministério do Desenvolvimento Regional (ANA, 2020; 2021), identificaram 76,2 milhões de hectares com potencial físico total de expansão da agricultura irrigada. No entanto, todo esse cenário de expansão deve ser avaliado com cuidado para garantir a segurança hídrica nacional por meio da gestão dos recursos hídricos. Em muitas regiões produtoras, as atuais práticas de irrigação não são sustentáveis e, mesmo sob cenários mais eficientes, as taxas de captação de água permanecem insustentáveis (DALIN et al., 2019; DAVIS et al., 2017).

Embora o Brasil detenha as maiores fontes de água doce do mundo, cerca de 70% estão distribuídas na região amazônica, enquanto o restante é distribuído para cerca de 95% da população do país. Devido a sua grande extensão territorial, vários conflitos no uso da água já são observados, principalmente, aqueles relacionados com o uso de água pela irrigação. Estes conflitos têm sido mais evidentes nas regiões Nordeste e Sudeste do Brasil (GETIRANA; AZEVEDO, 2020).

Nesse contexto, a estimativa do uso da água de culturas irrigadas tem sido uma ferramenta essencial na tomada de decisão no manejo dos recursos hídricos. A evapotranspiração real (ET_a) é uma variável chave neste processo, representando o total da água transferida da superfície terrestre para a atmosfera na forma de evaporação da água presente no solo e superfície das plantas e transpiração das plantas (XU et al., 2006). A estimativa e mapeamento da distribuição espaço-temporal da ET_a em grandes áreas tem sido um desafio devido à grande heterogeneidade espacial das variáveis usadas nos modelos, assim como a falta de dados de calibração e validação (BHATTARAI; WAGLE, 2021). No entanto, o sensoriamento remoto permite uma análise consistente e com menor custo quando comparado aos métodos baseados em medições de campo (WANNIARACHCHI; SARUKKALIGE, 2022). Além disso, os avanços tecnológicos obtidos com o processamento em nuvem, como a plataforma Google Earth Engine (GEE), e com a estimativa da ET_a baseada em dados termais de resolução espacial moderada, tem tornado

a estimativa do uso da água na irrigação em grandes áreas mais eficiente (e.g., SCHAUER; SENAY, 2019; MHAWEJ; FAOUR, 2020).

Ainda são poucos trabalhos científicos, baseados em tecnologias de sensoriamento remoto, têm como tema a estimativa do volume de água utilizado na irrigação de grandes áreas, provavelmente devido à dificuldade de se ter mapas de cultivos com boa acurácia em grandes áreas e estimativa de ETa com bom desempenho em diferentes regiões do país. ANA (2020) estimou o volume de água utilizado na irrigação para três períodos acumulados (maio a agosto/2018, maio a setembro/2018 e outubro/2018 a janeiro/2019) a partir de dados pontuais de captação de 25 pivôs localizados no Cerrado brasileiro. Casassola (2022) estimou o uso da água na agricultura irrigada por pivôs centrais no sul do Brasil, utilizando possíveis cenários agrícolas baseados em dados de evapotranspiração obtidos de estação meteorológica fora dos pivôs. Schauer e Senay (2019) realizaram a caracterização da dinâmica espaço-temporal do uso da água nas culturas irrigadas, combinando as estimativas anuais ETa com a classificação das culturas no Vale Central, Califórnia.

Diversos estudos, baseados em séries temporais de índices de vegetação (IVs) do sensor *Moderate Resolution Imagins Spectroradiometer* (MODIS), para o mapeamento agrícola no Brasil têm sido propostos na literatura devido à alta resolução temporal deste sensor (RUDORFF et al., 2010; BORGES; SANO, 2014; GUSSO et al., 2012; AR-VOR et al., 2011; VICTORIA et al., 2012). Contudo, a baixa resolução espacial do sensor MODIS (250-1000 m) não permite a detecção de pequenas áreas agrícolas (BENDINI, 2018). Bendini et al. (2019) classificaram diferentes culturas agrícolas no Cerrado, com acurácia maior que 90%, utilizando métricas fenológicas extraídas de séries temporais densas (8 dias de resolução temporal) de IVs de imagens dos satélites Landsat 7 e 8, com 30 m de resolução espacial. O uso de métricas fenológicas permitiu inferir o tempo de permanência da cultura no campo assim como o início e fim do ciclo, informações que podem auxiliar nos estudos da dinâmica do uso da água na agricultura.

Com relação à estimativa da ETa, a ANA implementou o modelo SSEBop (Operational Simplified Surface Energy Balance) com parametrização para o Brasil chamado de SSEBop-Br, em parceria com o Serviço Geológico dos Estados Unidos (United States Geological Survey – USGS) (ANA, 2020). Dentre os modelos que utilizam a solução de

variáveis do balanço de energia para obtenção da ETa em larga escala o modelo SSE-Bop é um dos mais simples, pois não resolve o balanço de energia completamente (SENAY, 2018). O SSEbop estima a ETa a partir da fração da evapotranspiração (ETf), obtida dados termais dos satélites *Landsat* e semelhante ao tradicional coeficiente de cultivo (Kc), e a evapotranspiração de referência (ETr), estimada pelo método Penman-Monteith (WALTER et al., 2000), para uma superfície de alfafa ou grama (SENAY et al., 2013).

Dentre os poucos trabalhos que objetivam estimar o uso da água na irrigação nenhum utilizou métricas fenológicas extraídas de séries temporais de IVs visando analisar o tempo de permanência das culturas no campo. Nos pivôs centrais do Cerrado brasileiro podem ser observados até três ciclos de cultivo em um único ano agrícola. Neste sentido, é fundamental o entendimento das datas de plantio e colheita das culturas para uma melhor estimativa do uso da água em cada ciclo.

Considerando o método de estimativa de consumo de água na agricultura irrigada proposto por Schauer e Senay (2019) e o método de mapeamento de culturas agrícolas proposto por Bendini et al. (2019), este estudo tem como objetivo estimar o uso da água em culturas irrigadas por pivô central, usando séries temporais de ETa e o mapeamento das culturas, a partir de métricas fenológicas extraídas de imagens de média resolução espacial (30 m) em uma região do Cerrado paulista para o ano agrícola 2015/2016.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta alguns fundamentos teóricos importantes para a compreensão dos conceitos de evapotranspiração (ET), os métodos para sua estimativa e a sua importância para a agricultura e recursos hídricos. Adicionalmente, será apresentada forma como as tecnologias de sensoriamento remoto podem ser utilizadas na estimativa da ET em grandes áreas de agricultura irrigada.

2.1 Evapotranspiração (ET)

A ET é o processo de transferência da água proveniente da evaporação de superfícies livres e transpiração das plantas para a atmosfera. A evaporação é o processo no qual a água líquida é convertida em vapor d'água (vaporização) e então removida da superfície (solo, lagos, rios, etc.). A transpiração consiste na vaporização da água líquida presente nos tecidos das plantas (ALLEN et al., 1998).

No Brasil, cerca de 75% da precipitação retorna para a atmosfera através da ET, sendo esta influenciada por diversos fatores como clima, tipo de solo, manejo da água e uso da terra (ANA, 2020). A ET é uma das variáveis mais importantes do balanço hídrico e é caracterizada por complexas mudanças espaço-temporais, principalmente em áreas de agricultura irrigada (CHEN et al., 2018). Nesse sentido, a estimativa dessa variável tem sido um dos principais objetos de estudo na agricultura dentro do contexto de produção de alimentos, escassez de água e mudança climática (NIU, et al., 2020). Por meio do mapeamento espaço-temporal da ET é possível ter um melhor entendimento sobre as variações do uso da água na agricultura permitindo, assim, uma melhor gestão dos recursos hídricos (KAPLAN, et al. 2014)

Na literatura, alguns conceitos relacionados à ET são apresentados. Segue abaixo alguns destes conceitos:

- Evapotranspiração Potencial (ETP): evapotranspiração de uma extensa e uniforme superfície curta que preenche todo o solo, não existindo limitação hídrica no perfil do solo (PENNAN, 1948, 1956).
- Evapotranspiração de Referência (ET₀): evapotranspiração de uma cultura de referência hipotética com características específicas, semelhante à variável ET de

uma superfície extensa de grama, de altura uniforme, em pleno desenvolvimento vegetativo e sem limitação hídrica no perfil do solo (ALLEN, 1998).

- Evapotranspiração real (ETa): quantidade de água transferida para a atmosfera em condições reais de umidade do solo, demanda atmosférica e estado da cultura agrícola (FOLHES, 2007).

O termo ETP não relaciona nenhuma cultura agrícola específica, no entanto há diversos tipos de culturas que podem se associar a definição original, proposta inicialmente na década de 1940. Neste sentido, o termo ET₀ surgiu para evitar ambiguidades decorrentes da definição da ETP. O termo ETa representa todos os processos em que a água líquida na ou próxima da superfície terrestre se torna vapor d'água atmosférico sob condições naturais (XU et al., 2006). De forma prática, a ETa é obtida relacionando a ET₀ com o K_c, que varia ao longo do ciclo da cultura.

Irmak e Haman (2017) apontam que a definição dos conceitos de ETP e ET₀ visa eliminar as variações específicas das culturas no processo de ET. O fato de não haver uma cultura específica definida no conceito de ETP resulta em um problema na estimativa correta da ETa, uma vez que as taxas de ET mudam entre as possíveis culturas adotadas como referência, dificultando a eliminação dessas variações específicas.

Dentro da importância da ET para estudos climáticos, diversos autores têm estudado a relação entre as mudanças climáticas e a ET e, conseqüentemente, com a produção agrícola. Segundo Bhatt e Hossain (2019), as mudanças climáticas diminuem a disponibilidade hídrica, principalmente nas regiões áridas e semiáridas devido ao impacto no balanço hídrico, causando mudanças na transpiração e evaporação das plantas. O aumento da temperatura global provê energia que favorece a mudança de fase da água através da evaporação, que é a componente da variável ET indesejada. Por outro lado, a transpiração é a componente mais desejada da ET, pois quanto maior a transpiração maior é a quantidade de nutrientes levados do solo para a planta, o que favorece o aumento da produtividade (BHATT et al., 2016).

Além disso, a ET é o principal fluxo de saída de água da superfície terrestre, sendo crucial para o entendimento das variações dos processos ecossistêmicos, hidrológicos e climáticos, podendo ser utilizada em inúmeras aplicações, como manejo dos recursos

hídricos, modelos hidrológicos, monitoramento de secas, previsões climáticas, irrigação, dentre diversos outros (LIOU; KARM, 2014).

A estimativa da ET é a primeira etapa do processo de estimativa do uso da água nas culturas agrícolas. Portanto, o estudo das tendências da ET e de sua dinâmica é essencial para o manejo dos recursos hídricos. Ao avaliar a tendência espaço-temporal da ET, Yassen et al. (2020) identificaram mudanças significativas na distribuição espacial da ET de referência ao longo dos últimos 35 anos em regiões agrícolas do Egito, ocasionadas pelas mudanças climáticas. Funes et al. (2021) avaliaram o impacto das mudanças climáticas no consumo hídrico de culturas agrícolas durante o crescimento vegetativo e reportaram que as mudanças climáticas podem causar limitação na produção agrícola irrigada e não irrigada, caso estratégias de mitigação não sejam aplicadas.

Informações sobre o uso da água na agricultura irrigada são essenciais para uma gestão dos recursos hídricos eficiente, principalmente em locais com conflito do uso da água. No entanto, medições diretas de ET são pontuais e caras, dificultando a aplicação em grandes áreas. Howes et al. (2015) estimaram a ET mensal utilizando métodos tradicionais, pois argumentaram que os métodos baseados em tecnologias de Sensoriamento Remoto (SR) requerem grande esforço computacional. Todavia, devido aos avanços no processamento em nuvem e na estimativa da ET, utilizando dados termais de resolução espacial moderada como os dos satélites *Landsat*, os métodos de estimativa do uso da água em grandes áreas têm se mostrado mais eficiente (SENAY et al., 2019).

2.2 Estimativa da variável ET

2.2.1 Métodos diretos e indiretos

A ET pode ser estimada utilizando métodos diretos e indiretos. Os métodos diretos são pontuais, não podendo ser aplicados para grandes áreas. Além disso, os equipamentos tais como os lisímetros são caros e necessitam também de um grande esforço para funcionamento (NIU et al., 2020). Os lisímetros são tanques preenchidos com solo que tem plantas em desenvolvimento (HOWELL et al., 1991). Eles são utilizados para determinar K_c , que é usado para diferenciar a ET_0 da ET_a da cultura. Nos lisímetros, o solo precisa ter uma profundidade suficiente para o desenvolvimento das raízes das culturas analisadas e o entorno do equipamento deve possuir a mesma cultura e nas mesmas condições, o que dificulta mais a manutenção (GLENN et al., 2007).

Os métodos indiretos são os baseados no balanço de energia ou em sensoriamento remoto. Dentre os métodos baseados no balanço de energia destacam-se a Razão de *Bowen* (BR) e *Eddy Covariance* (EC) (NIU et al., 2020). O método BR usa simultaneamente medições da temperatura vertical do ar e do gradiente de umidade para particionar o balanço de energia (BOWEN, 1926). Para isso, são utilizados dois grupos de sensores que medem a diferença de temperatura, CO₂ e umidade em duas alturas na camada limite turbulenta acima do dossel (normalmente, 0,5 m e 2,0 m acima do dossel). Neste caso, deve-se assumir que os coeficientes de transporte turbulento são equivalentes para estimativa da razão entre calor sensível (H) e latente (LE). Posteriormente, o resultado da razão é aplicado no balanço de energia para estimativa da ET (GLENN et al., 2007). O método EC estima H e a LE através de covariância estatística entre as variações de calor e umidade e velocidade vertical a partir de sensores de alta frequência (igual ou maior a 10Hz). O método EC tem um problema no fechamento de balanço de energia, sendo necessária uma correção para uma adequada estimativa da ET (LIANG et al., 2012).

Mesmo os métodos BR e EC sendo amplamente utilizados na literatura e sendo as principais fontes de estimativa da ET in situ, ambos apresentam limitações. A principal limitação é o fato de serem pontuais e possuírem alto custo para implantação. Segundo Angus e Watts (1984), sob condições de extrema seca ou considerável advecção de energia em condições de umidade, o método BR pode produzir resultados com baixa acurácia. Em relação ao método EC, é possível medir apenas os pequenos redemoinhos (“*eddies*”), mas os grandes redemoinhos nas camadas limite também podem ter importante contribuição no equilíbrio de energia (FOKEN, 2008). Nesse sentido, o uso das tecnologias de SR é visto como uma boa solução na estimativa da ET em larga escala, de forma contínua e com menor custo.

2.2.2 Estimativa da ET por SR

De acordo com Oliveira (2018), pode-se dividir os métodos de estimativa de ET baseados em tecnologias de SR em três grupos:

- Método físicos: que utilizam a dados de temperatura de superfície no modelo de balanço de energia na superfície (LSEB- *Land Surface Energy Balance*);

- Métodos empíricos ou estatísticos: a ET observada é relacionada com grandezas derivadas de produtos de sensoriamento remoto, como por exemplo índices de vegetação (IVs) e o coeficiente da cultura (Kc);
- Métodos híbridos: combinam dados de IVs com dados de temperatura de superfície.

Os modelos LSEB são a forma mais recente de estimativa de ET por sensoriamento remoto, combinando a expressão do balanço de energia com equações do fluxo da superfície terrestre e dados de temperatura obtidos por sensores remotos. Neste método, a ET é calculada através do calor latente, estimado como um termo residual do balanço de energia da superfície, conforme a seguinte equação:

$$LE = R_n - H - G \quad (2.1)$$

onde LE é o fluxo de calor latente ($W.m^{-2}$); R_n é o saldo de radiação ($W.m^{-2}$); H é o fluxo de calor sensível ($W.m^{-2}$); e G é fluxo de calor no solo ($W.m^{-2}$). Uma das principais vantagens desse método é que a abordagem do balanço de energia permite quantificar os fluxos da superfície terrestre e a sua dinâmica no uso da água sem a necessidade de referenciar a fonte de água, o que não é possível nos modelos baseados no balanço hídrico (RAHMAN; ZHANG, 2019).

Os modelos LSEB podem ser divididos em dois outros: (a) modelos de uma camada (OSEB- *One-Source Energy Balance*) e (b) modelos de duas camadas (TSEB-*Two-Source Energy Balance*). Os modelos OSEB tratam a superfície terrestre como uma grande folha com uma camada uniforme, sem distinção entre os fluxos na vegetação ou solo. Nesses modelos, a temperatura de superfície obtida por sensoriamento remoto é utilizada para estimar o gradiente de temperatura na superfície. Dentre os principais modelos OSEB, destacam-se os modelos *Surface Energy Balance Algorithm for land* (SEBAL) (BASTIAANSSEN et al., 1998), *Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration* (METRIC) (ALLEN et al., 2007), *Surface Simplified Energy Balance Index* (S-SEBI) (ROERINK, et al., 2000) e *Operational Simplified Surface Energy Balance* (SENAY et al., 2013). A diferença entre os modelos OSEB está na forma em que o modelo parametriza as variáveis do balanço de energia (TANG et al., 2013).

Nos modelos TSEB, há distinção entre a transferência de energia da superfície do solo e vegetação. Nesse tipo de modelo, a diferença entre as temperaturas radiométrica e de superfície aerodinâmica são obtidas incorporando os efeitos da geometria de aquisição de dados pelo sensor remoto, com o objetivo de separar a transferência de energia do solo e vegetação (TANG et al., 2013). Para os modelos TSEB, destacam-se os modelos desenvolvidos por Kustas (1990) e Norman et al. (1995).

Rahman e Zhang (2019) destacaram algumas fontes de incertezas relacionadas aos modelos LSEB que utilizam dados estimados por satélite: (a) erros devido à estimativa da temperatura da superfície a partir da banda termal; (b) incertezas decorrentes das resoluções espacial e temporal dos sensores; (c) incertezas nas estimativas do saldo de radiação; (d) incertezas devido à heterogeneidade da superfície; (e) inconsistência dos modelos; (f) dados meteorológicos e de fluxo de energia insuficientes; (g) transpiração noturna e orvalho diurno. Por outro lado, Schirmbeck et al. (2018) reportaram erros associados à estimativa de componentes do balanço de energia pelo modelo SEBAL em áreas agrícolas cultivadas fora do período do verão. Para Gowda et al. (2007), a principal desvantagem do modelo S-SEBI é que ele requer valores extremos de temperatura da superfície, o que pode não ser encontrado em uma única imagem. Além disso, eles observaram que o modelo METRIC necessita de dados meteorológicos de alta qualidade e em intervalos menores ou igual a uma hora.

McShane et al. (2017) reportaram que o modelo METRIC, embora apresentem boa acurácia, é muito complexo pois requer muitos dados de entrada e grande habilidade para sua implementação. Por outro lado, o modelo SSEBop é mais simples, de fácil implementação e necessita de poucos dados de entrada sem grandes perdas de acurácia. Nesse sentido, a ANA tem testado e adaptado o modelo SSEBop no Brasil desde 2015, com o principal objetivo de realizar a estimativa de uso da água em bacias hidrográficas com intensa atividade de irrigação (ANA, 2020).

2.2.2.1 Modelo SSEBop-Br

O modelo SSEBop (SENAY et al., 2013, 2016, 2017, 2018) é um modelo parametrizado para aplicações operacionais baseado no modelo *Simplified Surface Energy Balance* (SENAY, et al. 2007). No Brasil, o modelo foi adaptado pela ANA e é chamado de SSEBop-Br.

O modelo SSEBop-Br utiliza uma versão simplificada da equação de balanço de energia, assumindo que a diferença de temperatura entre a superfície da terra e o ar varia de forma linear conforme a temperatura da superfície. O modelo usa o mesmo conceito de pixel quente e pixel frio presentes nos modelos METRIC e SEBAL, no qual o pixel quente representa uma superfície de solo exposto e seco, enquanto o pixel frio representa uma superfície bem vegetada e úmida. Nesse sentido, o modelo considera a relação linear entre a diferença de temperatura do ar próxima à superfície e a temperatura da superfície para estimar o fluxo de calor sensível (H), considerando que no pixel quente não há fluxo de calor latente ($ET_a=0$) e no pixel frio a variável ET_a atinge os maiores valores (ANA, 2020).

A ET_a é estimada pelo SSEBop-Br da seguinte forma:

$$ET_a = ET_f \times ET_r \quad (2.2)$$

onde ET_r é a evapotranspiração de referência (mm).

ET_f é a fração da evapotranspiração que indica as condições de umidade da superfície terrestre para uma dada data e local e é definida por:

$$ET_f = \frac{T_h - T_s}{dT} = \frac{T_h - T_s}{T_h - T_c} \quad (2.3)$$

onde T_h é a temperatura estimada do pixel quente para uma determinada data e local; T_c é a temperatura estimada do valor do pixel frio para uma determinada data e local; T_s é a temperatura da superfície estimada para um dado pixel a partir de imagem de sensoriamento remoto; dT é a diferença de temperatura entre T_h e T_c para um dado pixel.

A fração da evapotranspiração (ET_f), K_c do método da FAO-56, é obtida a partir de imagens de sensoriamento termal e então multiplicada pela ET_0 , obtida pelo método de *Pennan-Monteith* (PMF) (ALLEN et al., 1998). O método PMF é calculado, geralmente, para superfície de alfafa. Entretanto, a superfície pode ser a grama, desde que ajustada pelo fator escalar (k), para um nível máximo de ET_r de cultura mais rugosa (ANA, 2020).

Conforme Senay et al. (2013), o pixel frio (T_c) é obtido pelo produto da temperatura máxima (T_a) por um fator de correção (*c-factor*):

$$Tc = c \times Ta \quad (2.4)$$

sendo Ta a temperatura máxima para uma dada data e local e c é o coeficiente de correção. A temperatura máxima é relacionada com a temperatura de superfície (Ts) em pixels bem vegetados.

Em Senay et al. (2013), o coeficiente de correção é determinado a partir da média sazonal entre Ts e Ta para todos os pixels que possuem valores de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (ROUSE et al., 1973) maior que 0,80. Na implementação do modelo no Brasil, a média entre as temperaturas Ts e Ta ocorre nos pixels com valor de NDVI maior que 0,75 (ANA, 2020).

O valor do pixel quente (Th) é obtido a partir da soma de Tc com a diferença de temperatura (dT), obtida pela seguinte equação:

$$dT = \frac{Rn \times rah}{pa \times Cp} \quad (2.5)$$

onde Rn é a média do saldo de radiação em situação de céu limpo ($J.m^{-2}.s^{-1}$); rah é a resistência aerodinâmica à transferência de calor de uma superfície hipotética nua e seca, usualmente igual a 110 s.m-1; pa é a densidade do ar ($kg.m^{-3}$); cp é o calor específico do ar na pressão constante ($1.013 kJ.kg^{-1}.K^{-1}$).

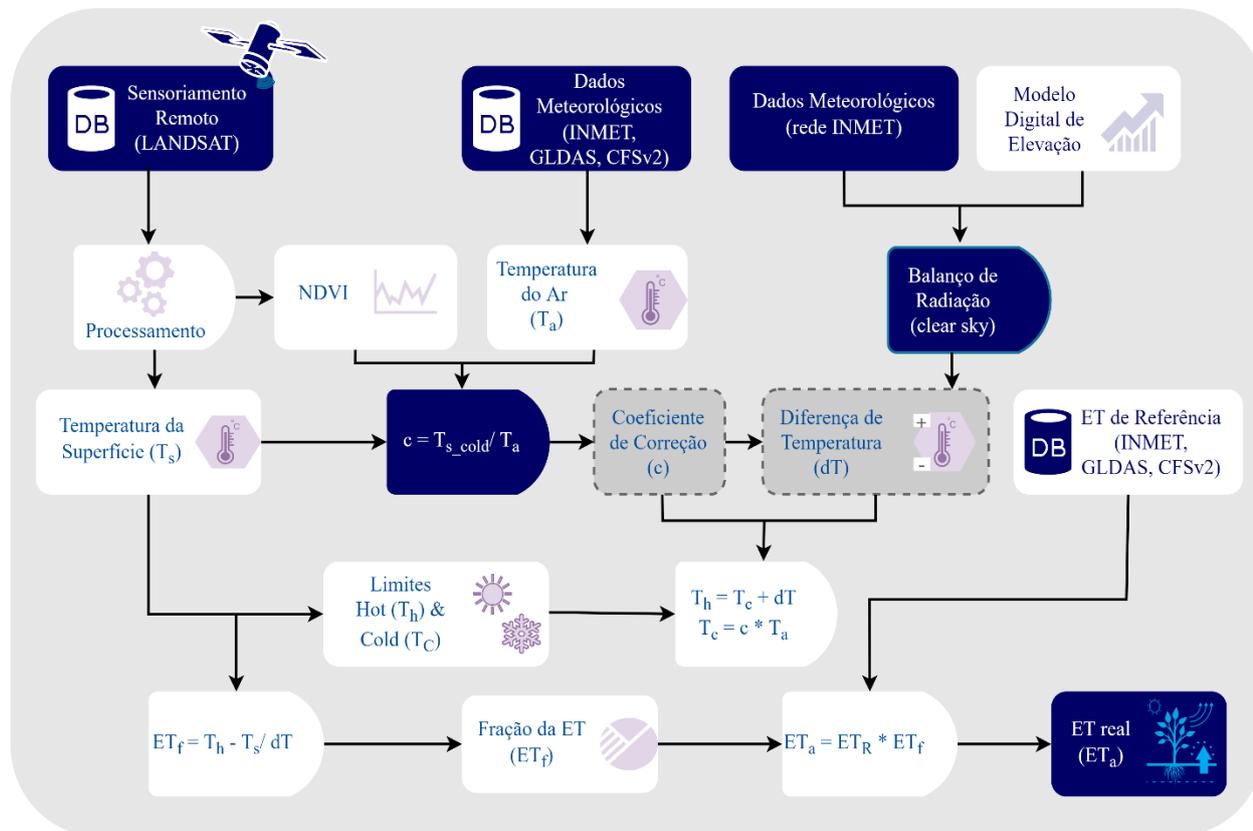
Finalmente, a evapotranspiração real (ETa) é definida por:

$$ETa = \frac{pa \times Cp}{Rn \times rah} (Th - Ts) \times k \times ET_r \quad (2.6)$$

sendo k o fator escalar para um nível máximo de evapotranspiração.

A Figura 2.1 apresenta o diagrama conceitual do modelo SSEBop para o Brasil. A Tabela 2.1 apresenta os dados necessários para implementação do SSEBop-Br, bem como as fontes dos dados e objetivo dentro do modelo. Os dados meteorológicos disponíveis para o Brasil são fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e ANA (XAVIER et al., 2016), bem como pelo *Global Land Data Assimilation System* (GLDAS 2.1) e *National Centers for Environmental Prediction Climate Forecast System* (CFSv2).

Figura 2.1 – Diagrama conceitual do modelo SSEBop-BR.



Fonte: Adaptado de Senay et al. (2016).

Tabela 2.1 – Resumo dos dados utilizados no modelo SSEBop-BR.

Dado	Símbolo	Fonte	Objetivo
Elevação de superfície	z	SRTM	Pressão do ar
Fator c	c	Dado meteorológico	T_c
Temperatura da superfície terrestre	T_s	<i>Landsat</i>	ET_f , ET_a
Temperatura máxima do ar	T_a	Modelo	R_n , T_h , T_c , dT
Diferença de temperatura	dT	Modelo	dT
Saldo de radiação líquida	R_n	Dado meteorológico	dT
ET de referência	ET_R	Modelo	ET_a
Resistência aerodinâmica	rah	<i>Landsat</i>	dT
Albedo	α	<i>Landsat</i>	T_s
Índice de Vegetação por Diferença Normalizada	NDVI	<i>Landsat</i>	c , T_c

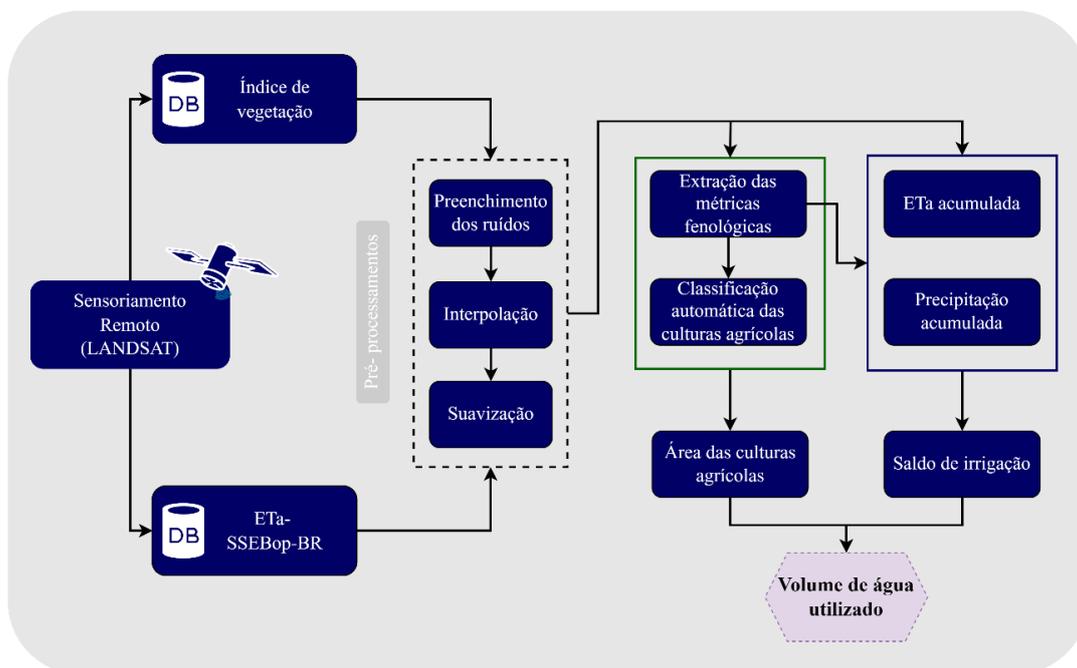
Fonte: Adaptado de Senay et al. (2016).

3 METODOLOGIA

O volume de água utilizado na irrigação depende do saldo de irrigação da cultura, isto é a diferença entre ETa e a precipitação, e da área da cultura. Neste sentido, a estrutura geral da metodologia é dividida, levando em conta os processamentos envolvidos na estimativa do saldo de irrigação e no mapeamento automático das culturas.

Na Figura 3.1, pode-se observar todas as etapas a serem realizadas para estimar o volume de água utilizado na irrigação de culturas agrícolas por pivô central.

Figura 3.1 – Fluxograma geral da metodologia de estimativa do volume de água usada na agricultura irrigada.



Fonte: Produção do autor

3.1 Área de estudo

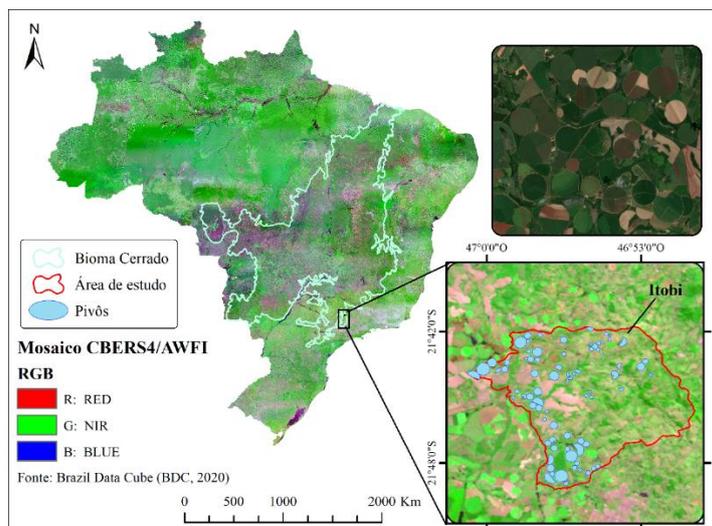
A área de estudo compreende o município de Itobi (13.844 ha) no estado de São Paulo, no bioma Cerrado. O bioma Cerrado tem um papel fundamental na produção de alimentos e desenvolvimento socioeconômico do Brasil. E, devido às condições de relevo favoráveis ao cultivo de culturas anuais em larga escala, o pivô central é o principal método de irrigação utilizado neste bioma (ALTHOFF E RODRIGUES, 2019).

A região encontra-se na sub-bacia do Rio Tambaú- Rio Verde, localizada a sul-sudeste da Bacia do Rio Pardo (Figura 3.1). Na região a classe de clima predominante é a Cwa,

caracterizado como subtropical quente e com inverno seco (SETZER, 1966). A precipitação média anual é de 1517mm, com a estação chuvosa entre os meses de outubro a março e pico das chuvas em dezembro. A estação seca ocorre de abril a setembro e o menor volume de precipitação observado ocorre nos meses de julho e agosto. A temperatura média anual é de 22° C, variando entre 24° C em janeiro e 19° C em julho (CABRAL et al., 2012).

A região na qual o município está localizado compreende o polo de irrigação Vertentes do Rio Pardo e Mogi Guaçu, com área total de 1.097.088 ha e área irrigada total de 129.287 ha. Este polo de irrigação possui potencial total e efetivo de 232.575 ha e 65.989 ha, respectivamente, e é considerada um dos polos com maior perspectiva de expansão (ANA, 2021; 2020). A irrigação por pivô central é utilizada predominantemente para o cultivo de hortaliças, principalmente batata e cebola, no período de março a outubro (ANA, 2020; SILVEIRA, et al., 2013). Nas últimas duas décadas o município teve um aumento expressivo no número de pivôs centrais e no total de área irrigada. No entanto, pelo fato da sub-bacia do Rio Tambaú- Rio Verde apresentar alta demanda hídrica (consumo maior do que 50% da Q7,10), ela é região propensa a conflitos do uso da água (SILVEIRA et al., 2013; COMITÊ DA BACIA DO PARDO, 2005). Além disso, o polo extrapola uma unidade da federação e contém corpos hídricos de domínio da união, exigindo ainda mais esforços integrados de gestão e planejamento dos recursos hídricos (ANA, 2021).

Figura 3.2 – Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Produção do autor.

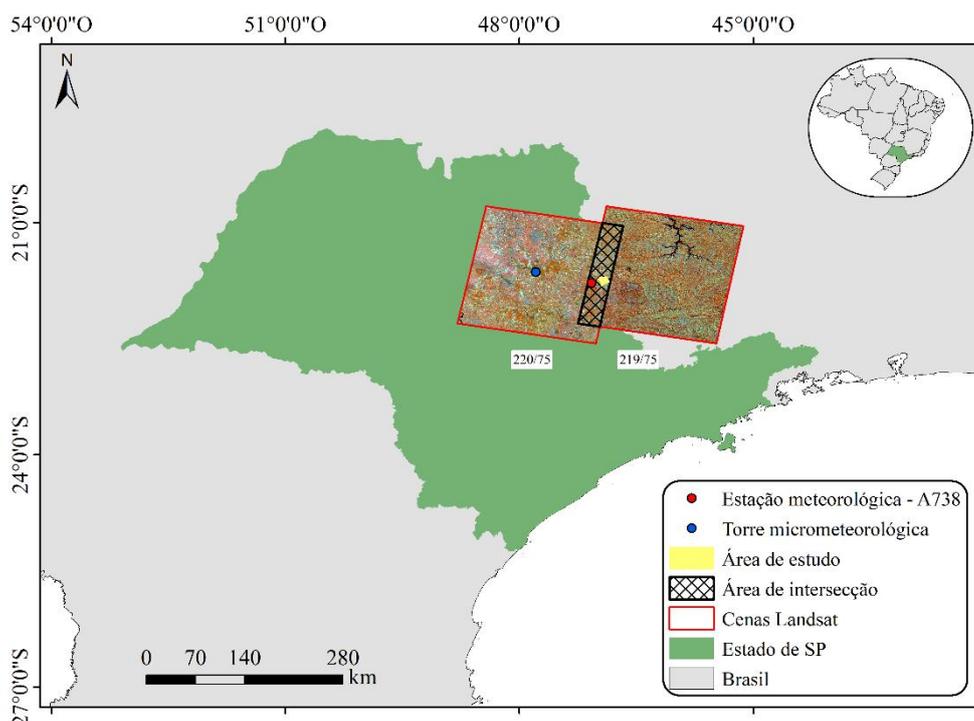
3.2 Obtenção de dados

3.2.1 Dados de sensoriamento remoto

Para o desenvolvimento deste trabalho, imagens dos sensores *Operational Land Imager* (OLI) e *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) a bordo dos satélites *Landsat 8* e *7*, respectivamente, foram utilizadas. Foram selecionadas imagens referentes ao ano agrícola de agosto de 2015 a outubro de 2016, de acordo com o ano agrícola definido pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) (CONAB, 2019).

A localização da área de estudo na sobreposição de duas cenas *Landsat* (órbitas/ponto 220/75 e 219/75) (Figura 3.2) permitiu a obtenção de 102 imagens no ano agrícola.

Figura 3.3 – Localização da área de estudo com a sobreposição de cenas *Landsat* referentes às órbitas/ponto 220/75 e 219/75 e localização das estações meteorológicas utilizadas no estudo.



Fonte: Produção do Autor.

As imagens *Enhanced Vegetation Index* (EVI) (LIU; HUETE, 1995) foram obtidas na plataforma GEE, através do plugin do QGIS, GEE Time Series Explorer (RUFIN et al., 2021) para os satélites *Landsat 7* e *8*. O valor de EVI é definido pela equação abaixo:

$$EVI = G \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + C_1 \times \rho_{RED} - C_2 \times \rho_{BLUE} + L} \quad (3.1)$$

onde ρ é a reflectância de superfície atmosféricamente ou parcialmente corrigida; L é o coeficiente de ajuste de fundo do dossel; C_1 e C_2 são os coeficientes do termo de resistência a aerossóis; G é o fator de ganho. Os valores de coeficiente adotados foram $L= 1$, $C_1= 6$, $C_2= 7,5$ e $G= 2,5$, conforme descrito em Huete et al. (2002).

As imagens de ETa foram obtidas a partir do aplicativo SSEBop-Br v.1.01, que está integrado na plataforma GEE (<https://ssebop.users.earthengine.app/view/ssebop-br-v101>). O aplicativo SSEBop-BR é o resultado da cooperação entre ANA e USGS para implementar e parametrizar o modelo SSEBop para a realidade morfoclimática do Brasil. A máscara de agricultura irrigada por pivô central foi obtida a partir do mapeamento da agricultura irrigada por pivô central para o ano de 2014, realizado pela ANA e Embrapa (ANA, 2019) (disponível em: <https://dadosabertos.ana.gov.br>). Neste trabalho, foi assumido que a máscara não teve alteração para o ano agrícola 2015/2016.

3.2.2 Dados in situ

Para validação do modelo SSEBop- BR, foram utilizados dados ETa obtidos da torre micrometeorológica localizada em uma área de cana-de-açúcar pertencente à Companhia Energética Santa Rita (21,63° S, 47,78°W, altitude de 552m) (Figura 3.2). O espaçamento da cultura no local é de 1,4 m com uma área superior a 400 ha, sendo cercada por citros, pastagem e vegetação natural do tipo cerrado. O solo é Latossolo Vermelho-Amarelo, sendo 22% de argila, 74 % areia e 3% silte e possui densidade a 2,6m de profundidade de 1500 kg m⁻³. Devido às colheitas mecanizadas a densidade da camada de 10-25 cm é de cerca de 1636 kg m⁻³ (CABRAL et al., 2012). Ao redor da torre o plantio de cana-de-açúcar é homogêneo em todas as direções dentro de um raio de 500 m. A altura média do dossel varia da emergência da cultura até cerca de 3,5 metros na colheita (TASCH, 2006; CABRAL et al., 2012).

Os dados coletados no sítio englobam dois ciclos de rebrota da cana-de-açúcar, denominados de ciclo 1 (14 de abril de 2005 até 11 maio 2006, totalizando 393 dias) e ciclo 2 (11 de maio de 2006 até 20 de maio de 2007, totalizando 374 dias). A evapotranspiração total foi de 829 mm e 690 mm no ciclo 1 (2005/06) e ciclo 2 (2006/07),

respectivamente. No dia 14 de abril de 2005 ocorreu a colheita da cana já queimada, com a palhada sendo deixada sobre o solo. Entre os dias 12 e 20 de maio ocorreu a queima da palha acumulada e posterior aragem e adubação do solo (TASCH, 2006).

Os dados derivados da torre correspondem às variáveis do balanço de energia obtidas pelo sistema EC, sendo elas saldo de radiação (R_n), fluxo de calor no solo (G), calor sensível (H) e calor latente (LE), com medições a cada 30 minutos. Para obter a ETa, foi realizado o fechamento do balanço de energia e posterior recálculo de H e LE pelo método BR ($\beta=H/LE$) utilizando as Equações 3.2 e 3.3, conforme descrito em Twine et al. (2000).

$$H_{\beta} = \frac{\beta(R_n - G)}{1 + \beta} \quad (3.2)$$

$$LE_{\beta} = \frac{(R_n - G)}{1 + \beta} \quad (3.3)$$

O fechamento do balanço dos sistemas EC frequentemente apresenta erros causados possivelmente pela época de obtenção dos dados, local e características da cobertura do solo, incertezas de medição e armazenamento de calor no solo (TWINE et al., 2000; IRMAK et al., 2014; OLIVEIRA, 2018). Após a correção das variáveis do balanço de energia a ETa foi obtida a partir da fração da ETr observada e Kc obtidos pelo sistema EC. Os dados de ETa foram integrados para a escala diária. Para maiores detalhes consultar Oliveira (2018).

Para o cálculo do saldo de irrigação, foram utilizados os dados de precipitação da estação meteorológica A738 do INMET, localizada no município de Casa Branca, SP (21,78°S, -47,08°W, altitude de 734m) (Figura 3.2). A estação A738 no município de Casa Branco foi escolhida em virtude da ausência de estações in situ na área de estudo.

Para o treinamento do modelo de classificação de culturas foram utilizados dados de campo coletados durante a safra 2015/16 no município de Itobi-SP, descritos em Bendini (2018) e Bendini et al. (2019). A dinâmica agrícola da área de estudo ao longo do ano foi analisada em três visitas. Em cada uma das visitas foram coletadas as coordenadas das amostras com aparelho GNSS e as informações de rotação de cultura nos pivôs centrais visitados foram obtidas diretamente com os produtores. Os limites dos talhões foram identificados por meio de interpretação visual nas imagens de satélite. Ao todo foram obtidos 33 polígonos divididos em 7 classes, que representam as culturas cultivadas na

safra 2015/16 nos pivôs analisados. Cerca de 50 pixels aleatórios, com distância mínima de 30 metros dentro de cada polígono, foram selecionados, como mostra a Tabela 3.1. Conforme descrito em Bendini (2018), um buffer negativo de 30 metros foi aplicado nos mesmos para evitar a mistura espectral nas bordas dos polígonos.

Tabela 3.1 – Descrição das amostras de culturas.

Classe	N° de amostras	Grupo de culturas
Milho + Feijão	143	1º ciclo + ciclo de inverno
Milho + Cenoura	86	1º ciclo + ciclo de inverno
Milho + Cebola	91	1º ciclo + ciclo de inverno
Milho + Batata	183	1º ciclo + ciclo de inverno
Milho + Soja	284	1º ciclo + 2º ciclo
Soja	81	1º ciclo
Soja + Batata	612	1º ciclo + ciclo de inverno

Fonte: Produção do autor.

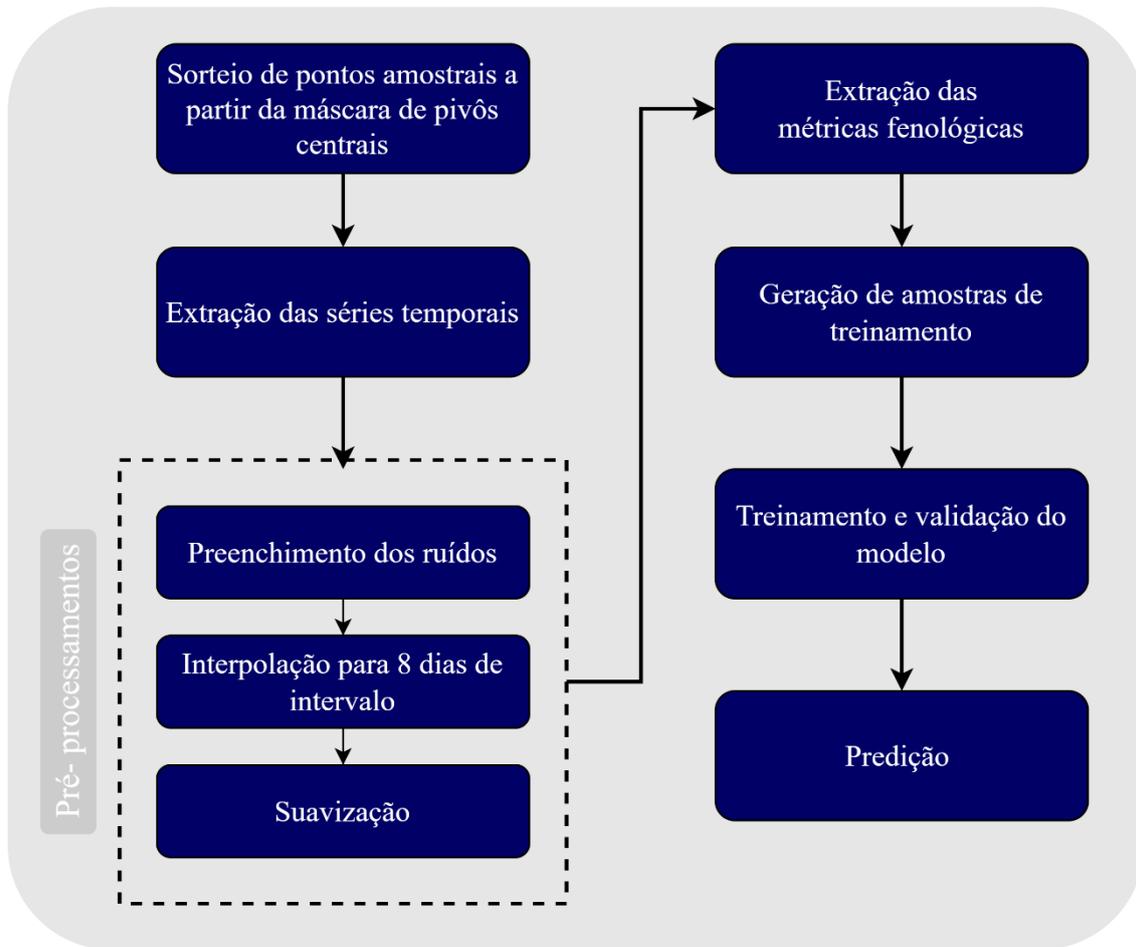
O processamento das séries temporais de EVI e de ETa é descrito nas seções a seguir.

3.3 Mapeamento de cultivos

A classificação das culturas presentes nos pivôs centrais é baseada na metodologia proposta por Bendini et al. (2019), que utiliza métricas de séries temporais densas de imagens EVI dos satélites *Landsat*, interpoladas e suavizadas. Os autores avaliaram o método em diferentes áreas do Cerrado, com diferentes condições de clima, práticas agrícolas e vegetação. Esta metodologia foi utilizada para analisar os padrões de cultivo dentro dos pivôs do Cerrado, cujos resultados foram publicados na segunda edição do Atlas de Irrigação (ANA, 2021).

O fluxograma com as etapas da metodologia de mapeamento de culturas agrícolas nos pivôs centrais é apresentado na Figura 3.3.

Figura 3.4 – Fluxograma do mapeamento de culturas agrícolas nos pivôs centrais.



Fonte: Adaptado ANA e INPE (2021).

3.3.1 Processamento das séries temporais de EVI

Considerando a máscara de pivôs definida pela ANA, foi realizada uma amostragem hexagonal para representar toda a área do pivô, o que resultou em média 16 pontos por pivô central. Um total de 1294 pontos em 80 pivôs localizados dentro da área de estudo foi selecionado. Como esta abordagem analisa um conjunto de pontos em cada área de pivô central, o processamento exige menor esforço computacional. A área de um dado pivô é linearmente proporcional à quantidade de pontos amostrados de forma homogênea dentro do pivô. Os pontos foram obtidos dentro de um buffer de 30 metros de distância da borda dos pivôs. Posteriormente, as séries temporais de EVI foram extraídas para cada ponto amostral, excluindo as observações das séries com a presença de nuvem, utilizando o algoritmo *fMask* (ZHU et al., 2015).

Para reduzir os ruídos nas séries temporais de EVI causados por nuvens, sombras de nuvem e falha do *Scan Line Corrector* (SLC) no *Landsat 7*, foi utilizado o filtro de *Kalman* (HARVEY, 1990), que consiste em uma série de equações matemáticas para estimar o estado de um processo, minimizando a média do erro quadrático. Posteriormente, para obter séries temporais com 57 observações regularmente espaçadas no tempo, num intervalo regular de 8 dias para o período da análise, foi realizada uma interpolação baseada na função *spline* bi cúbica (DOUGHERTY et al., 1989). Finalmente, as séries temporais foram suavizadas com o filtro *Savitzky-Golay* (JÖNSSON AND EKLUNDH, 2004), com uma janela de tamanho 4.

3.3.2 Extração das métricas fenológicas e classificação de culturas

As métricas fenológicas foram extraídas a partir das séries temporais de EVI utilizando o pacote *Stmetrics*, desenvolvido em linguagem Python (SOARES et al., 2020). Ao todo foram extraídas 13 métricas fenológicas para cada ciclo no período analisado, como apresentado na Tabela 3.2. Para a área de estudo, foram observados pivôs com uma ou duas safras, no ano agrícola 2015/2016. A safra dupla foi representada pelo 1º ciclo no verão com o 2º ciclo logo em seguida, ou ainda o 1º ciclo no verão com o 2º ciclo no inverno. A Tabela 3.2 apresenta a descrição resumida das métricas a serem utilizadas no mapeamento da agricultura (JONSSON; EKLUNDH, 2002, 2004 e 2015).

Tabela 3.2 – Descrição das métricas fenológicas.

Métrica	Descrição
Data do início do plantio (Strt)	Momento em que se identifica um aumento significativo na subida da curva do EVI, de acordo com um limiar da fração da amplitude da série temporal
Data do final do plantio (End)	Momento em que se identifica uma diminuição significativa na descida da curva do EVI, de acordo com um limiar da fração da amplitude da série temporal
Duração do ciclo (Lngth)	Duração do ciclo sazonal
Valor da base (Bsvl)	Média entre os valores mínimos do início e do final do ciclo sazonal
Data da metade do ciclo (Pkv1)	Momento médio em que, respectivamente, a borda esquerda aumentou para o nível de 80% e a borda direita diminuiu para o nível de 80%
Valor máximo do ciclo (Pkt)	Maior valor do ciclo
Amplitude (Ampl)	Diferença entre o valor máximo do ciclo e o valor da base
Integral do maior ciclo (L_ntgrl)	É a integral da função que descreve o ciclo, entre o início e o final do plantio
Integral do menor ciclo (S_ntgrl)	É a integral da diferença entre a função que descreve o ciclo sazonal e o valor de base do início ao final do ciclo
Valor no início do ciclo (Strtvl)	Valor da função no momento do início do ciclo
Valor no final do ciclo (Endvl)	Valor da função no momento do final do ciclo
Taxa de crescimento ao início do ciclo (L_Drv)	Razão da diferença entre os níveis de 20% e 80% da subida da curva, em relação a amplitude, e a duração do período correspondente
Taxa de decréscimo ao final do ciclo (R_Drv)	Valor absoluto da razão entre a diferença entre os níveis de 20% e 80% da descida da curva, em relação a amplitude, e a duração do período correspondente

Strt, End e Pkv1 representados pelo número da observação na série temporal. Para relação com a data, multiplica-se o valor pelo intervalo das observações (8 dias) e soma-se ao dia Juliano correspondente a primeira observação da série temporal; Bsvl, Pkt, Ampl, Strtvl e Endvl representados pelo valor do EVI; L_ntgrl, S_ntgrl, L_Drv e R_Drv são adimensionais.

Fonte: Adaptado de Jonsson e Eklundh (2002).

3.3.3 Classificação Random Forest e análise dos resultados

Após a extração das métricas fenológicas, o modelo *Random Forest* (RF) (BREIMAN, 2001) foi treinado utilizando as amostras de campo coletas nos pivôs centrais. A classificação foi realizada em linguagem de programação R utilizando o pacote *randomForest* (LIAW; WIENER, 2002), com os parâmetros *ntree* e *mtry* iguais a 90 e 5, respectivamente. O parâmetro *ntree* representa número de árvores de decisão a serem geradas, que é determinado com base na observação da estabilização do erro e o *mtry* representa o número de número de variáveis a serem selecionadas e testadas para a melhor divisão durante o crescimento das árvores (BELGIU; DRAGUT, 2016). O modelo RF foi escolhido, pois vem sendo utilizado em trabalhos de mapeamento baseados em métricas fenológicas no Cerrado (BENDINI, 2018; BENDINI et al., 2019; HADDAD et al., 2022). A avaliação do resultado do modelo utilizou o método de simulação Monte Carlo (RUBINSTEIN; KROESE, 2008). O modelo foi treinado 1000 vezes, selecionando aleatoriamente 70% dos dados para treinamento e 30% para validação. Em cada uma das simulações foram calculados a matriz de confusão, contendo as métricas de acurácia global do modelo (CHINCHOR; SUNDHEIN, 1993) e o f1-score (SHAPIRO, 1999) para cada classe. Ao final das simulações foi calculada a média da acurácia global e f1-score das classes.

A acurácia global (AG) representa o número de acertos em relação ao número total de observações:

$$AG = \frac{VP + VN}{VP + FP + FN + VN} \quad (3.4)$$

onde, VP é o número de verdadeiros positivos, VN o número de verdadeiros negativos, FP o número de falsos positivos e FN o número de falsos negativos.

O VP representa o número de pontos classificados como pertencentes a uma classe e que realmente são desta classe. FP representa o número de pontos classificados como pertencentes a uma classe, mas que não são de outra classe. FN representa o número de pontos que pertencem a uma dada classe, mas foram classificados como sendo de outra classe. Na Figura 3.5 é apresentado um exemplo da matriz de confusão e seus elementos.

Figura 3.5 - Demonstração da matriz de confusão.

		Valores preditos	
		Positivo	Negativo
Valores reais	Positivo	VP	FN
	Negativo	FP	VN

Fonte: Produção do autor.

O f1-score representa a média harmônica entre os valores de precisão (P) e revocação (R) ou *recall* para cada uma das classes:

$$f1 - score = 2 \times \frac{1}{\frac{1}{P} + \frac{1}{R}} \quad (3.5)$$

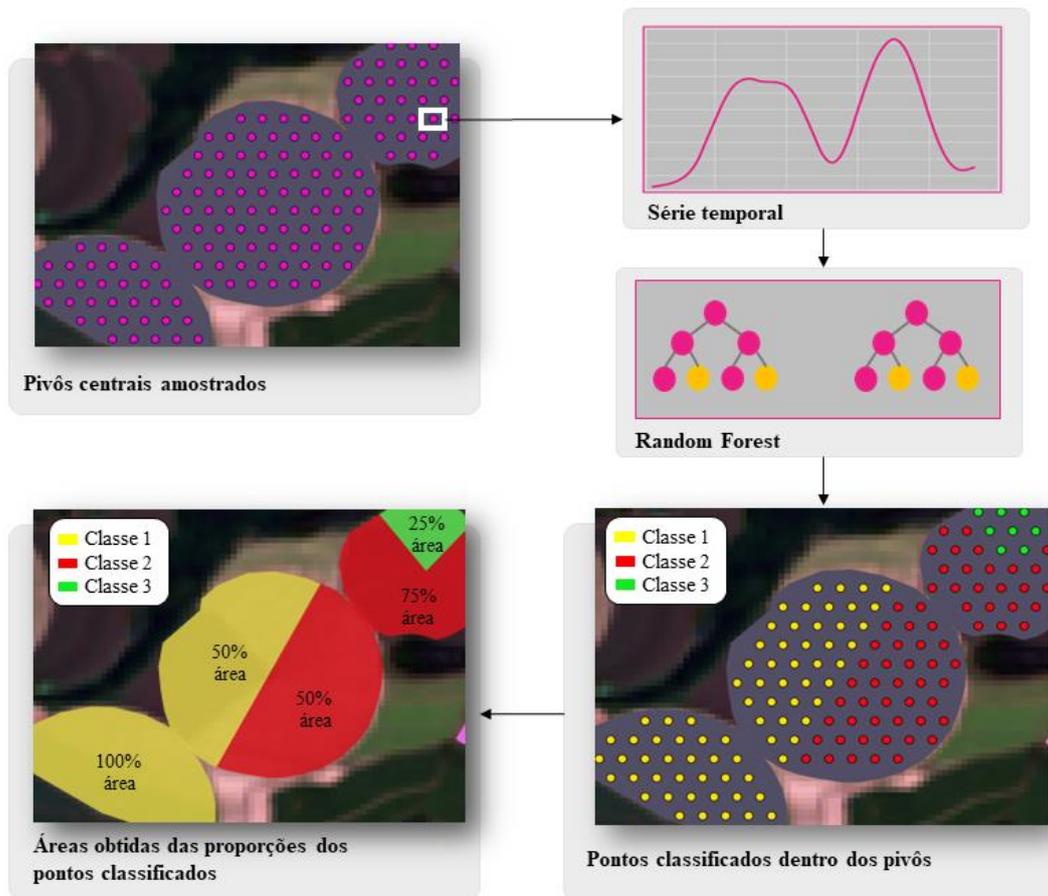
onde:

$$P = \frac{VP}{VP + FP} \quad (3.6)$$

$$R = \frac{VP}{VP + FN} \quad (3.7)$$

As áreas das classes foram obtidas de forma proporcional à quantidade de pontos classificados dentro de cada pivô, conforme apresentado na Figura 3.6. Por exemplo, caso 100% dos pontos de um pivô sejam classificados como uma dada classe, a área da classe naquele pivô será igual à área total do pivô.

Figura 3.6 – Esquema da classificação automática dos pivôs centrais.



Fonte: Produção do autor.

3.4 Evapotranspiração real (ETa)

As imagens de ETa, obtidas através do aplicativo SSEBop-BR, são calculadas a partir de três fontes de dados meteorológicos: INMET (XAVIER et al., 2016), GLDAS 2.1 e CFSv2.

Com o objetivo de analisar as diferenças entre os resultados do modelo obtidos por diferentes fontes de dados (INMET, GLDAS E CFS), a estimativa ETa será calculada para cada uma delas.

3.4.1 Processamento das séries temporais ETa

Os processamentos das séries temporais de ETa são semelhantes aos processamentos realizados nas séries temporais de EVI (seção 3.3.2). Os ruídos identificados nas imagens (nuvens, sombra de nuvens, problema SLC das imagens *Landsat-7* e outros) foram

minimizados por meio do filtro de *Kalman* (HARVEY, 1990). A função *spline* bi cúbica (DOUGHERTY et al., 1989) foi utilizada para gerar séries temporais com as observações diárias com o objetivo de obter a ETa acumulada ao longo do ciclo da cultura. Além disso, as séries temporais foram suavizadas pelo filtro *Savitzky-Golay* (JÖNSSON AND EKLUNDH, 2004), definido por uma janela de tamanho 4.

3.4.2 Análise de desempenho do modelo SSEBop-Br

Os valores de ETa estimados pelo modelo SSEBop-Br foram comparados com a ETa obtida pela estação micro meteorológica localizada em uma área de cana-de-açúcar (Figura 3.2). A avaliação do modelo foi realizada com base no erro absoluto médio (MAE), viés, índice de concordância de *Willmott* (WILLMOTT, 1981) e coeficiente *Nash-Sutcliffe* (ENS) (NASH; SUTCLIFFE, 1970).

A medida de avaliação MAE mede a magnitude dos erros das estimativas nas mesmas unidades da variável analisada. Quanto mais próximo de zero melhor o ajuste em relação à série observada.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |S_i - O_i| \quad (3.13)$$

sendo MAE o erro absoluto médio (mm), S_i é o valor de ETa estimada pelo modelo (mm) e O_i o valor de ETa observado em campo (mm).

A medida PBIAS indica se existe uma sub ou superestimativa em relação aos dados de referência em porcentagem:

$$PBIAS = 100 \sum_{i=1}^n \frac{(S_i - O_i)}{O_i} \quad (3.14)$$

O índice de concordância de *Willmott* (adimensional), d , é uma medida normalizada do grau do erro de predição de um modelo:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - O_i| + |O_i - O|)^2} \quad (3.15)$$

onde O é a média dos valores de ETa observados em campo.

Valores de “d” iguais a 1 indicam ajuste perfeito aos dados observados (WILLMOTT, 1981).

O índice normalizado, ENS, determina a magnitude relativa da variância residual comparada à variância dos dados observados (NASH; SUTCLIFFE, 1970):

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \quad (3.16)$$

onde E_{NS} é o coeficiente *Nash-Sutcliffe* (adimensional).

Para avaliar os dados em relação aos valores de ENS, Van Liew et al. (2007) propõem a seguinte classificação: ENS = 1 significa ajuste perfeito dos dados preditos pelo modelo; ENS > 0,75 indica que o modelo é adequado e bom; 0,36 < ENS ≤ 0,75 indica que o modelo é considerado satisfatório; e ENS < 0,36 indica que o modelo não é satisfatório.

3.5 Uso da água na irrigação

A estimativa do volume de água utilizado na irrigação nas culturas agrícolas foi baseada na metodologia proposta por Schauer e Senay (2019), na qual os autores relacionam a ETa obtida pelo modelo SSEBop com a área das culturas. O volume de água utilizado na irrigação de uma cultura agrícola num dado ciclo (m³) é calculado da seguinte forma:

$$Vol. utilizado = \left(\frac{Saldo de irrigação \times Área total da cultura \times 10}{0,85} \right) \quad (3.17)$$

em que Saldo de irrigação é a diferença entre a ETa acumulada média para os pontos classificados como uma dada cultura (mm) e a precipitação acumulada (mm). A Área total da cultura é a área total estimada de uma dada cultura (ha), 10 é o fator de conversão e 0,85 é a eficiência adotada do pivô central (ANA, 2021).

O saldo de irrigação é calculado assumindo que toda a precipitação ocorrida no ciclo foi efetiva mesmo sabendo que isto pode subestimar o uso da água (SCHAUER; SENAY, 2019). As datas de início e final de ciclo utilizadas na agregação da ETa e precipitação foram obtidas através das métricas Strt e End. A métrica Strt representa o momento em que se observa um aumento significativo na subida da curva do EVI e não a data real de plantio, uma vez que na data de plantio não há resposta vegetal suficiente para ser expressa pelo índice de vegetação. Nesse sentido, a data real de plantio foi estimada

empiricamente subtraindo 15 dias da data correspondente à métrica Strt (ANA; INPE, 2021).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise de desempenho do modelo SSEBop-Br

A Tabela 4.1 mostra as medidas do desempenho do modelo SSEBop-BR na geração da ETa na cultura de cana de açúcar em regime de sequeiro. A Figura 4.1 apresenta a comparação entre os dados estimados e observados para as fontes de dados da rede brasileira de estações (INMET), GLDAS e CFSv2, enquanto a Figura 4.2 apresenta os mapas de ETa para a área de estudo analisada. A Figura 4.3 apresenta o perfil temporal da ETa observada em campo e estimada pelo SSEBop-Br.

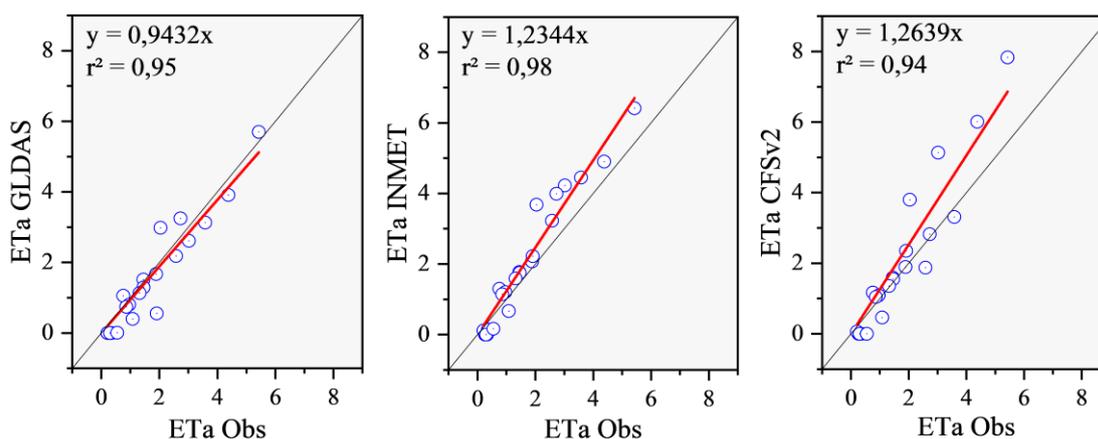
Tabela 4.1 – Medidas de desempenho do modelo SSEBop-Br.

Modelo	MAE	RMSE	NSE	PBIAS	r ²
INMET	0,53	0,66	0,77	20,20	0,98
GLDAS	0,40	0,49	0,88	-12,10	0,95
CFSv2	0,59	0,91	0,57	15,70	0,94

MAE e RMSE em mm.d⁻¹

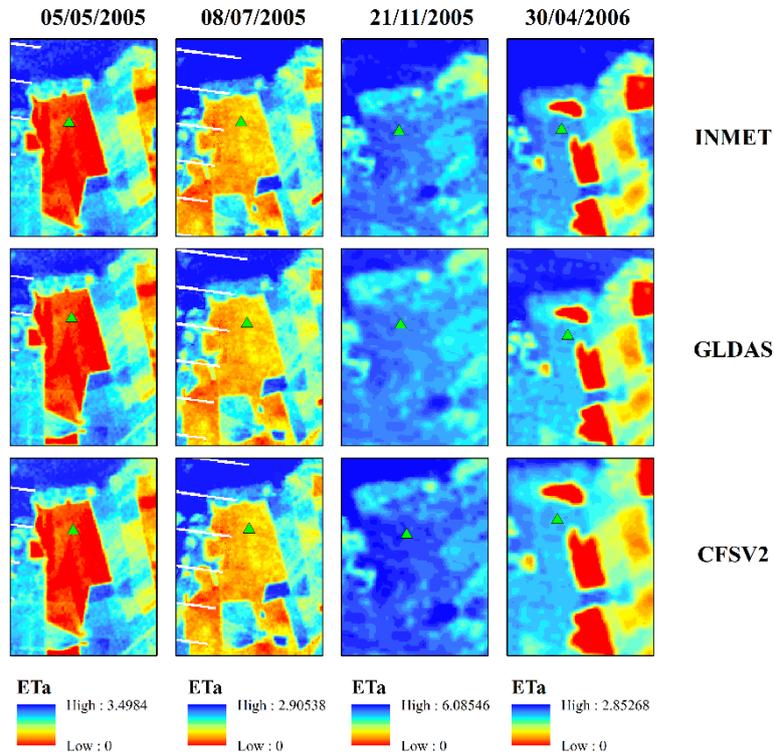
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.1 – Comparação da ETa estimada pelo modelo SSEBop-Br e observada em cada estação micrometeorológica.



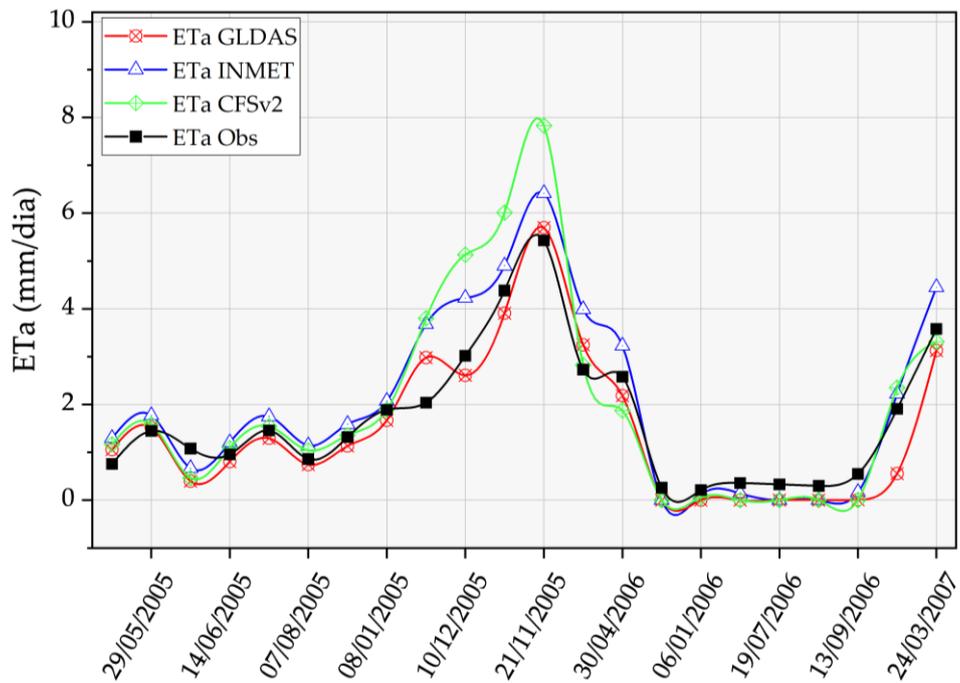
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.2 – Comparação visual da ETa estimada pelo modelo SSEbop-Br e observada em cada estação micrometeorológica.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.3 – Perfil temporal da ETa estimada pelo modelo SSEBop-Br e observada em estação micrometeorológica.



Fonte: Produção do autor.

Com base nas Tabela 4.1 e Figuras 4.1 é pode-se observar que a ETa estimada a partir da fonte de dados do INMET explicou 98% dos valores observados em campo, seguido da fonte de dados GLDAS (95%) e CFSV2 (94%). Ao observar a linha de tendência em relação à reta 1:1 observa-se que a ETa obtida a partir das fontes do INMET e CSFV2 tende a superestimar a ETa. Para a fonte de dados GLDAS é possível observar o melhor ajuste da linha de tendência, indicando maior proximidade entre os dados observados em campo e os dados estimados pelo modelo SSEBop-Br.

O modelo CFSv2 apresentou maior superestimava dos dados durante a fase de crescimento da cultura, que ocorre durante o período chuvoso e no qual também são observados os maiores valores de ETa. O modelo do INMET apresentou tendência de superestimativa dos valores de ETa durante a maior parte do ciclo. Os valores de PBIAS corroboram com esses resultados, sendo que os dados do INMET e CFSv2 superestimaram a ETa em 20,2% e 15,7%, respectivamente, enquanto os dados GLDAS subestimaram a ETa em 12,1%. Embora a ETa estimada a partir de dados do INMET tenha apresentado maior r^2 é possível notar na Tabela 4.1 que a fonte de dados que estima a ETa com menores valores do MAE e do RMSE, bem como maior coeficiente ENS é a GLDAS, seguida do INMET e CFSv2.

Oliveira (2018) estimou a ETa na mesma área de estudo e sob as mesmas condições que o presente trabalho utilizando o modelo METRIC em dois cenários: 1) utilizando dados meteorológicos como entrada do modelo, obtidos na própria torre micrometeorológica e 2) utilizando dados meteorológicos obtidos da fonte GLDAS. No primeiro cenário, o autor obteve r^2 de 0,95, MAE igual a 0,21 mm d-1 e RMSE igual a 0,35 mm d-1 quando comparado a ETa estimada pelo METRIC com dado obtido em campo. No segundo cenário, o autor obteve uma superestimativa de 25% no valor da ETa, r^2 de 0,86, MAE igual a 1,03 mm d-1, RMSE igual a 1,17 mm d-1. Na Tabela 4.1 pode-se observar um comportamento oposto (subestimativa) ao utilizar a fonte de dados GLDAS como entrada do modelo SSEBop-Br. Oliveira (2018) afirma que a superestimava do modelo METRIC está associada à seleção automática dos pixels frios para a calibração interna do calor sensível (H). Quando comparado ao METRIC, o SSEBop é considerado uma alternativa mais simples, pois demanda menos dados de entrada e possui parametrização mais objetiva, o que facilita a sua implementação sem significativa perda de precisão na

estimativa da ETa (McSHANE et al., 2017; ANA, 2020). Por este motivo, o modelo SSEBop tem sido utilizado pela USGS na estimativa do uso da água na irrigação nos Estados Unidos e pela ANA, desde 2015 (SSEBop-Br), na estimativa do uso da água proveniente das bacias hidrográficas na agricultura irrigada no Brasil (ANA, 2020).

Portanto, embora sendo uma alternativa mais simples que o modelo METRIC, o modelo SSEBop-Br aplicado na estimativa da ETa em áreas de agricultura, nas condições morfoclimáticas brasileiras, mostrou-se eficaz.

A Tabela 4.2 mostra as medidas de desempenho, r^2 , do modelo SSEBop-Br com dados de campos em três unidades da federação (GO, DF e RS) para as culturas de soja, trigo, feijão, arroz e cenoura (DIAZ et al., 2019; LOPES et al., 2019; PAULA et al., 2019). É importante destacar que o processo de estimativa da ETa em campo não é trivial, que pode incorrer certo grau de incerteza decorrente dos sensores utilizados, rotinas de processamento usadas, cálculo dos dados, bem como condições ambientais durante a operação (ANA, 2020).

Tabela 4.2 – Desempenho do modelo SSEBop-BR em diferentes regiões.

Local	Cultura	Período	n° observações	r^2		
				INMET	GLDAS	CFSv2
Cristalina/GO	Soja	11/2014 a 02/2015	4	0,88	0,92	0,95
Cristalina/GO	Soja	01/2015 a 02/2015	4	0,84	0,85	0,78
Distrito Federal/DF	Feijão	05/2015 a 08/2015	8	0,74	0,52	0,37
Luziânia/GO	Trigo	06/2017 a 09/2017	12	0,77	0,81	0,73
Cachoeira do Sul/RS	Arroz	12/2010 a 03/2015	68	0,58	0,65	0,72
Paraíso do Sul/RS	Arroz	08/2003 a 07/2004	17	0,80	0,63	0,77
Cristalina/GO	Cenoura	07/2014 a 10/2014	9	0,86	0,70	0,94
Média				0,78	0,73	0,75

Fonte: Adaptado da ANA (2020).

Em todas as culturas analisadas, pelo ao menos uma fonte de dados resultou em valor de r^2 maior que 0,7. Embora a média dos valores de r^2 tenha sido maior para a fonte de dados do INMET, para a maioria das culturas os modelos globais GLDAS e/ou CFSv2 apresentaram coeficiente de determinação superiores. Nos casos de culturas cultivadas no Cerrado o r^2 da fonte de dados INMET variou entre 0,74 e 0,88. Para a fonte GLDAS a variação foi entre 0,52 e 0,92 (soja), enquanto a fonte CFSv2 variou de 0,37 a 0,95. Em todos os casos, o menor valor de r^2 foi observado para a cultura de feijão e o maior para

a cultura da soja. No entanto, é importante destacar a pouca quantidade de observações de campo nesses casos.

A maior quantidade de dados de campo foi obtida para a cultura de arroz (85 observações). O r^2 nesse caso variou entre 0,58 e 0,8, dependente da fonte de dados utilizada. Os modelos de estimativa de ETa podem apresentar maiores limitações no período de exposição a lâminas d'água durante o cultivo do arroz (ANA, 2020). No entanto, pôde-se obter um desempenho adequado do modelo SSEBop-Br quando comparado a uma série mais extensa de dados de campo.

4.2 Classificação de cultura e obtenção da área plantada

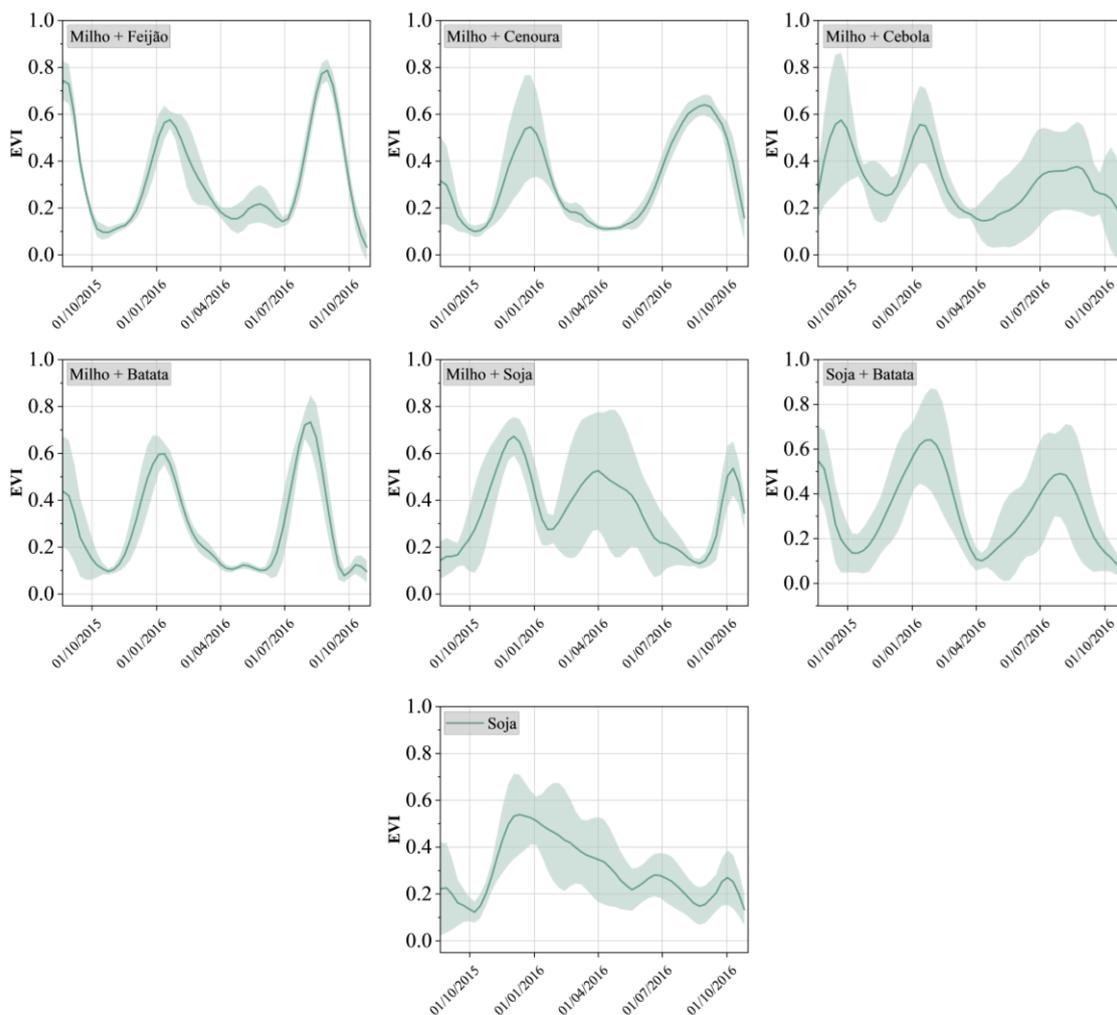
A área total e a área média dos pivôs localizados dentro da área de estudo é 1584,3 e 20 ha, respectivamente. A área média dos pivôs no bioma Cerrado é 68,8 ha, 70,1% maior que a área média dos pivôs na área de estudo.

O perfil temporal (Figura 4.4) do padrão de cultivo 1° ciclo de verão com 2° ciclo logo em seguida foi representado pela classe Milho + Soja. O plantio do milho nesses casos variou de setembro a novembro, enquanto a colheita ocorreu majoritariamente nos meses de janeiro e fevereiro. O plantio da soja ocorreu logo em seguida da colheita do milho, sendo colhida nos meses de junho e julho. Para o padrão de cultivo caracterizado pelo 1° ciclo de verão e 2° ciclo de inverno, o plantio do 1° ciclo, representado principalmente por milho, ocorreu entre setembro e dezembro, enquanto a colheita ocorreu entre a fevereiro e abril. Os ciclos de inverno são representados no estudo pelas culturas de batata, cebola, cenoura e feijão, com plantio variando principalmente entre maio e julho e colheita nos meses de setembro e outubro. Estes períodos de cultivo corroboram com Silveira et al. (2010), que realizaram a identificação de pivôs centrais na sub-bacia hidrográfica Tambaú-Verde com dados de sensoriamento remoto. Resultados semelhantes também foram obtidos por Bendini et al. (2019) ao avaliarem os padrões temporais das mesmas classes no mesmo local e período do presente estudo.

Na Tabela 4.3 são apresentados o f1-score de cada classe, bem como a acurácia global do modelo. Os resultados foram semelhantes aos obtidos por Bendini et al. (2019). Na Figura 4.5 é apresentado o resultado da classificação dos pontos localizados nos pivôs centrais do município de Itobi-SP no ano agrícola 2015/16 e na Figura 4.6 é apresentada a área total das classes.

Embora aplicado o método de Monte Carlo, não foi controlado se a ocorrência das amostras de treino e validação ocorreram no mesmo pivô de modo a evitar a redundância dos dados de entrada do modelo. Isto se deve ao baixo número de amostras, causados pela indisponibilidade de uma quantidade maior de dados de campo. Contudo, os resultados demonstram o potencial do uso de métricas fenológicas no mapeamento de culturas.

Figura 4.4 – Perfil temporal médio do EVI com seu respectivo desvio padrão para cada classe no ano agrícola 2015/16 baseado nos pixels das amostras coletadas em campo.



Fonte: Produção do autor.

A área de estudo é caracterizada pelo cultivo heterogêneo de hortaliças produzidas em pequenas propriedades rurais, principalmente batata e cebola. Além disso, há um intenso uso da irrigação por pivô central, podendo alcançar até três ciclos produtivos em um ano agrícola (SILVEIRA et al., 2010; SILVEIRA et al., 2013; BENDINI et al., 2019). Esta heterogeneidade pode ser observada na Figura 4.5 na qual foi possível identificar também

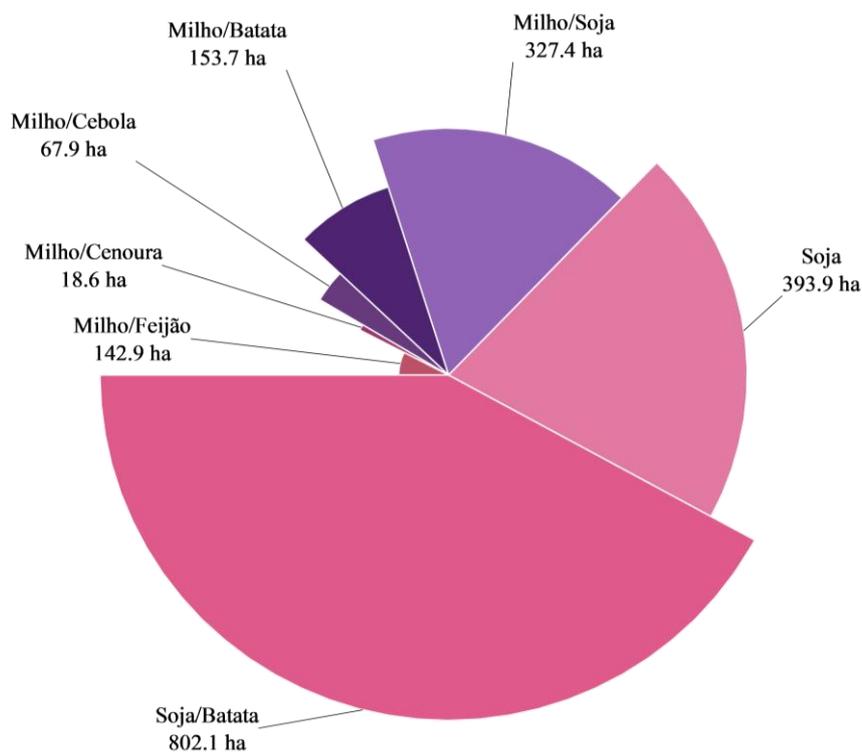
mais de um tipo de cultura por pivô ao mesmo tempo. Portanto, o uso de métricas fenológicas extraídas de séries temporais densas de índices de vegetação permite a identificação de padrões fenológicos heterogêneos, mesmo dentro de pivôs centrais com menor áreas, como no caso de Itobi-SP, corroborando com os resultados obtidos por Bendini et al. (2019) e ANA (2020).

Tabela 4.3 – Acurácia global e f1-scores obtidos em cada classe.

Classe	F1-Class-score
Milho + Feijão	0,9964
Milho + Cenoura	0,9954
Milho + Cebola	0,9983
Milho + Batata	0,9952
Milho + Soja	0,9998
Soja	0,9742
Soja + Batata	0,9947
Acurácia Global	0,9951

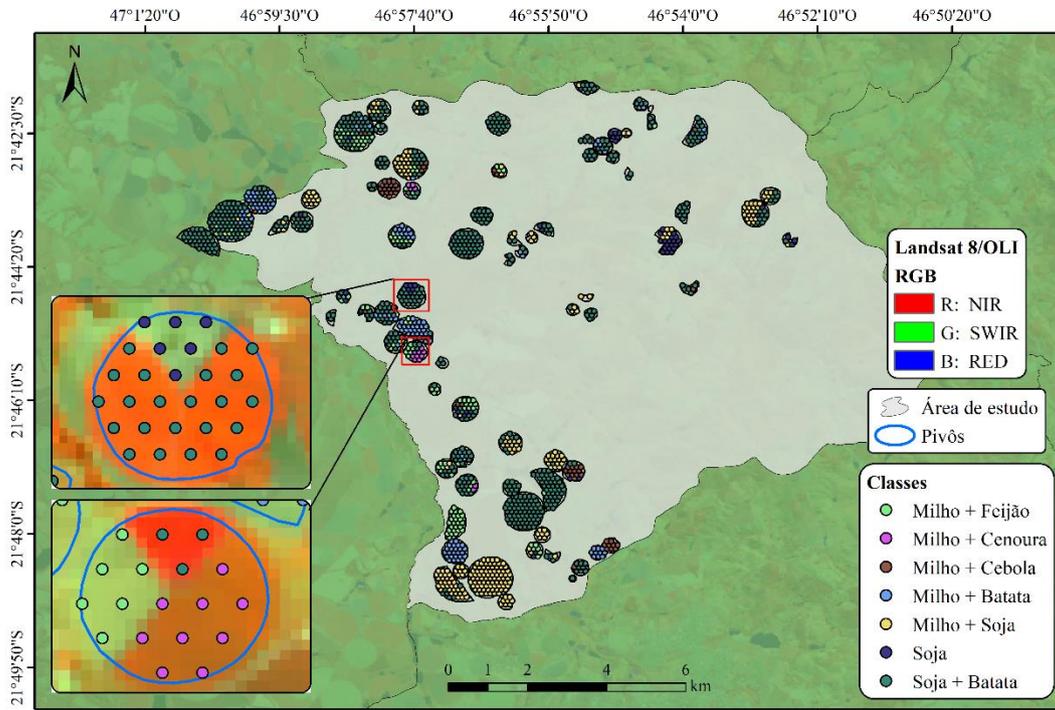
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.5– Área total das classes.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.6 – Resultado da classificação para o município de Itobi- SP no ano agrícola 2015/16. Em destaque dois exemplos da classificação demonstrando a variabilidade das culturas dentro dos pivôs.



Fonte: Produção do autor.

4.3 Uso da água na irrigação

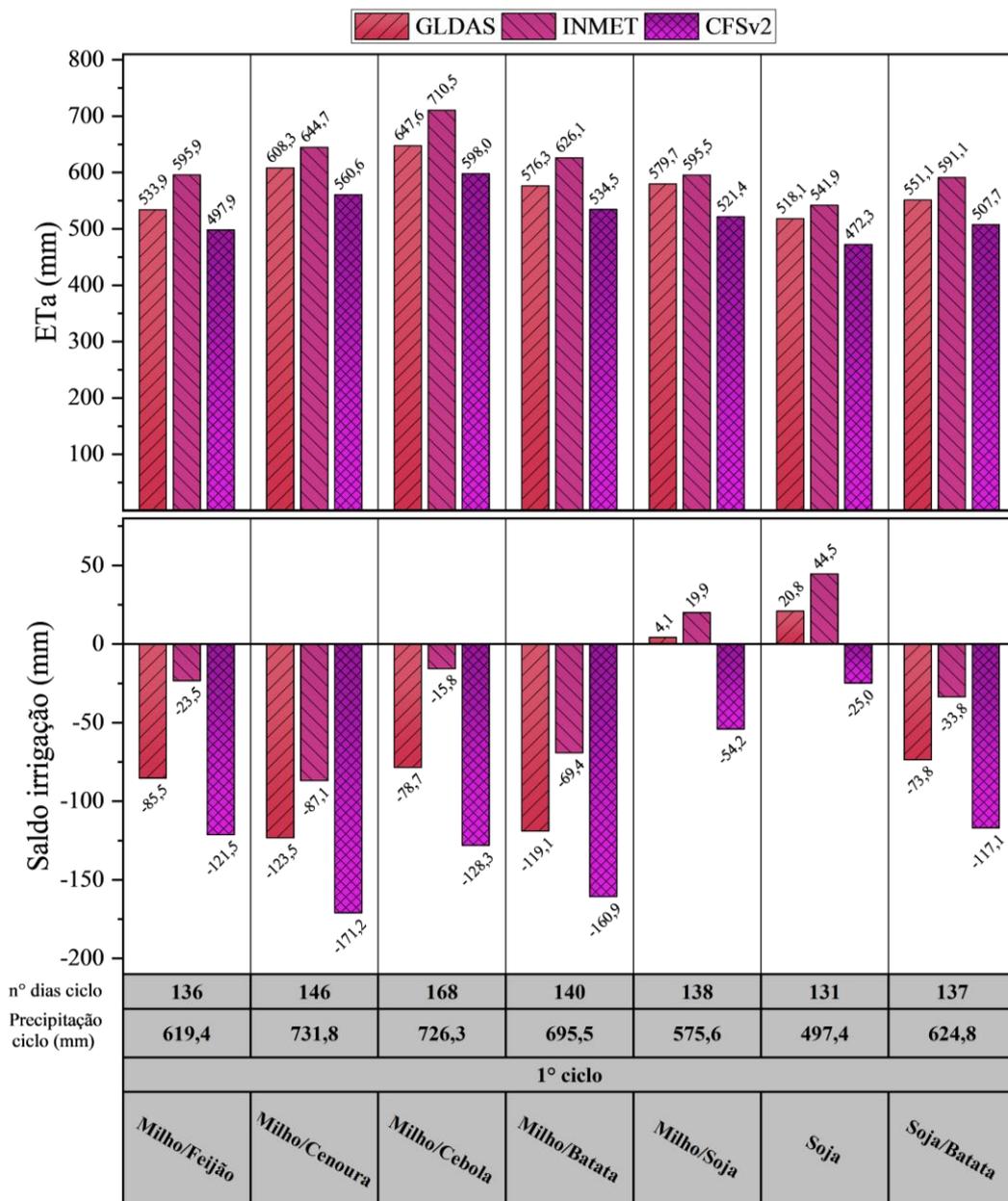
4.3.1 Primeiro ciclo agrícola

A Figura 4.7 apresenta a ETa, precipitação, saldo de irrigação e duração do primeiro ciclo (soja e milho) das classes analisadas no estudo para cada fonte de dados climáticos utilizada pelo modelo SSEBop-Br.

Em relação a ETa é possível perceber que, em todas as classes, os maiores valores de ETa foram obtidos ao utilizar a fonte de dados do INMET. Os menores valores de ETa foram obtidos ao utilizar a fonte CFSv2. Como já mencionado, o modelo SSEBop estima a ETa a partir da ETr, que por sua vez é obtida pelo método de *Penman-Monteith* (WALTER et al., 2000) a partir das três fontes de dados meteorológicos disponíveis. A velocidade do vento, temperatura, radiação e umidade relativa do ar são as principais variáveis climáticas utilizadas na estimativa da ETr (DARSHANA et al., 2013, MATZENAUER et al., 1992), portanto qualquer variação em uma dessas variáveis pode influenciar o resultado o final da ETa, sendo a radiação a variável que exige maior precisão (LE MOS

FILHO et al., 2010). No entanto, a fonte de dados INMET é um grid de variáveis meteorológicas baseado em estações distribuídas pelo país, consolidado por Xavier et al. (2016). Logo, espera-se que a fonte de dados do INMET seja a que melhor represente a ETa no território brasileiro, contudo ainda não há trabalhos que avaliem a fonte de dados que melhor estima as variáveis meteorológicas nos diferentes biomas brasileiros.

Figura 4.7 – ETa, precipitação e saldo de irrigação acumulados médios e duração do primeiro ciclo das classes.



Fonte: Produção do autor.

Conforme observado na Figura 4.7, para o milho (primeiro ciclo da safra dupla) o valor de ETa acumulado médio foi 542,5 mm para a fonte CFSv2, 589,2 mm para GLDAS, 634,5 mm para INMET. Radin et al. (2003) obtiveram valores de ETa entre 575 e 732 mm (média de 656 mm) por ciclo ao avaliarem o valor de ET da cultura durante 4 safras. Segundo os autores, A variação foi devido, principalmente, à demanda evaporativa da atmosfera, que é determinada principalmente pela radiação solar. A duração do ciclo variou entre 136 e 168 dias.

O saldo de irrigação do milho foi negativo em todas as classes analisadas, exceto para a classe de Milho + Soja, que apresentou saldos de 4,1 e 19,9 mm com as fontes de dados GLDAS e INMET, respectivamente. O saldo de irrigação é a diferença entre o valor de ETa e a precipitação durante o ciclo da cultura pode ser um indicativo de uso de irrigação, pois caso a precipitação não seja suficiente (valores positivos de saldo de irrigação) então houve a necessidade de suplementação hídrica (irrigação) para que a cultura pudesse efetivamente alcançar a ET apontada. No entanto, não se pode afirmar que não houve irrigação durante os ciclos analisados, pois algumas culturas possuem períodos de alta sensibilidade ao déficit hídrico. No caso do milho, este período é relativamente curto, que vai da floração e o início de enchimento de grãos (MATZENAUER et al., 2002). Dessa forma, o milho se configura como uma das culturas mais afetadas por déficits hídricos (RADIN et al., 2003).

Embora a quantidade de chuvas ao longo do ano seja suficiente para o cultivo da safra a má distribuição das chuvas pode causar quebra na produtividade, sendo comum no Cerrado a ocorrência de veranicos, que são períodos secos no meio do período chuvoso (EMBRAPA, 2006). Nestes casos o produtor pode fazer o uso da irrigação por pivô central de forma a suprir a demanda hídrica da cultura durante o veranico, garantido que o potencial produtivo da área seja minimamente afetado.

Em relação a soja, à ETa acumulada média foi de 490 mm para a fonte CFSv2, 534,6 mm para GLDAS e 566,52 mm para INMET. Resultado semelhante foi demonstrado por Alves (2020) ao estimar a ETa da soja no Cerrado utilizando o método FAO 56 Dual (ALLEN et al., 1998), obtendo valor igual a 515 mm acumulados durante o ciclo da cultura. A duração do ciclo da soja variou entre 131 e 137 dias. A duração do ciclo da soja pode variar de 70 a 180 dias de acordo com o grupo de maturação, normalmente

denominados como precoce, semiprecoce, médio, semitardio e tardio (EMBRAPA SOJA, 2002). Contudo, o número de dias de um determinado grupo pode variar ainda em função da cultivar, condições de manejo e, principalmente, das condições edafoclimáticas da região de plantio (EMBRAPA, 2011).

Em relação ao saldo de irrigação, pode-se observar na Figura 4.7 que a soja, como ciclo único no ano agrícola, apresentou valores positivos para as fontes GLDAS e INMET, enquanto a soja, cultivada em sistema duplo, apresentou valores negativos de saldo de irrigação para todas as fontes. A diferença no saldo de irrigação da soja observada nos dois tipos de cultivo (safra única e safra dupla) pode ser explicada pela data de plantio. A soja de ciclo único apresenta plantio mais tardio (Figura 4.4), que se estende até dezembro em alguns casos. A soja no sistema de safra dupla (soja + batata) apresentou plantios até novembro. Essa diferença no plantio pode ser notada de forma indireta pelos valores de precipitação acumulada em ambos os casos. Na soja de ciclo único a precipitação acumulada é menor (497,4 mm), o que indica que parte do seu ciclo ocorreu em períodos de menor precipitação e possível suplementação hídrica por meio da irrigação.

4.3.2 Segundo ciclo agrícola

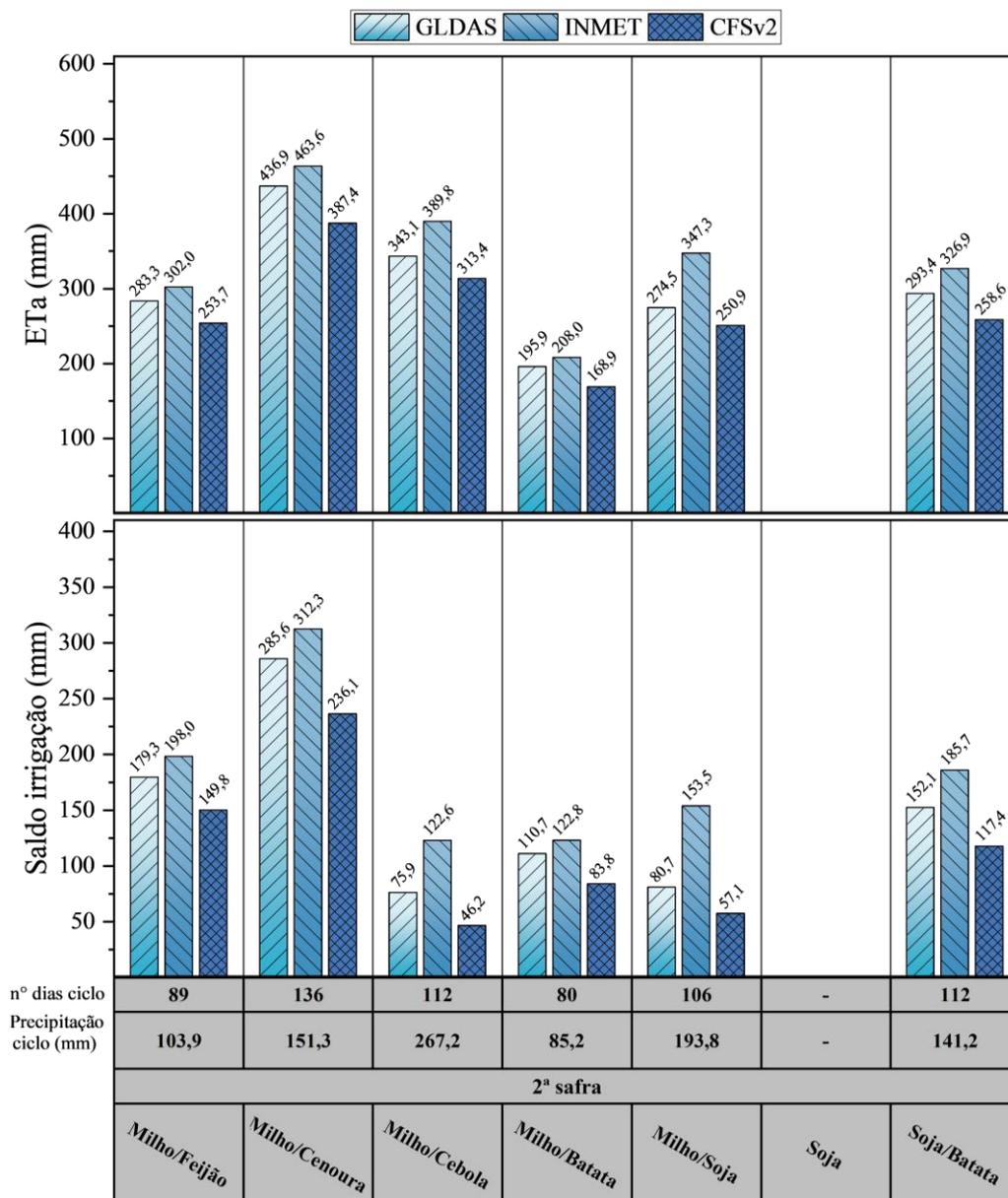
A Figura 4.8 apresenta a ETa, precipitação, saldo de irrigação e duração do segundo ciclo, que corresponde às culturas de inverno (feijão, cenoura, cebola e batata) e a soja de 2º ciclo (cultivada após o milho) para cada fonte de dados climáticos utilizada pelo modelo SSEBop-Br. Dentre as fontes de dados, a fonte INMET apresentou os maiores valores de ETa, seguida da fonte GLDAS e CFSv2 em todas as culturas, semelhante ao ocorrido na análise das culturas do primeiro ciclo.

A cenoura foi a cultura que apresentou maiores valores de ETa, sendo igual a 463,6 mm, 436,9 mm e 387,4 mm, utilizando as fontes INMET, GLDAS e CFSv2, respectivamente, para um ciclo de 136 dias. Lunardi e Filho (1999) obtiveram valor de ETa igual a 423 mm para a cenoura com ciclo de 117 dias em região próxima a área de estudo deste trabalho, utilizando lisímetro. Moura et al. (1994) obtiveram valores de ETa iguais a 365 mm, num ciclo de 110 dias.

Os valores de ETa no ciclo da cenoura estão de acordo com os valores reportados pela Embrapa (2007), que diz que a necessidade hídrica da cultura varia de 350 e 550 mm por ciclo, dependendo das condições climáticas e da duração do ciclo. Além disso, é

destacado que a cenoura é altamente sensível ao déficit hídrico e requer umidade do solo próxima à capacidade de campo com lâminas de aplicação correspondentes à ET da cultura.

Figura 4.8 – ETa, precipitação e saldo de irrigação acumulados médios e duração do segundo ciclo das classes.



Fonte: Produção do autor.

Na cultura do feijão o valor de ETa obtido foi de 302 mm, 283,3 mm e 253,7 mm, respectivamente para as fontes INMET, GLDAS e CFSv2. Matzenauer et al. (1998) obtiveram valores de ET total no ciclo do feijão variando entre 228,2 e 361,4 mm

utilizando evapotranspirômetros de drenagem. Os valores de ETa obtidos com o modelo SSEBop- Br estão de acordo também com os valores apresentados pela Embrapa (2018), que estão, de forma geral, entre 250 e 350 mm durante o ciclo, sendo a cultura altamente sensível ao estresse hídrico durante a floração e início da formação das vagens e, em menor grau, na fase vegetativa.

De acordo com a Associação Brasileira da Batata (ABBA, 2006) a ET total da batata varia entre 250 e 550 mm a depender da duração da cultivar e demanda evaporativa. Segundo a ABBA o ciclo varia entre 85 e 120 dias, podendo ser inferior a 85 dias na produção de batata-semente. Os valores de ETa médios estimados pelo modelo SSEBop-Br para cultura da batata foram de 267,5 mm para a fonte INMET, 244,7 mm para a fonte GLDAS e 213,8 para a fonte CFSv2. O ciclo da cultura da batata, determinado a partir das métricas fenológicas extraídas das séries temporais variou entre 80 e 112 dias. A batata é considerada uma cultura exigente em água, necessitando de um suprimento adequado durante todos os estádios de desenvolvimento da planta (ABBA, 2006).

O ciclo médio da cultura da cebola foi de 112 dias (Figura 4.8). A ETa foi igual a 389,2 mm ao utilizar a fonte INMET, 343,1 mm para fonte GLDAS e 313,4 para a fonte CFSv2. Estes valores variam de acordo com a necessidade hídrica da cultura. Segundo a Embrapa (2005), estes valores variam de 350 a 650 mm e duração entre 100 e 210 dias, sendo as maiores durações para o plantio tardio na região Sul do país.

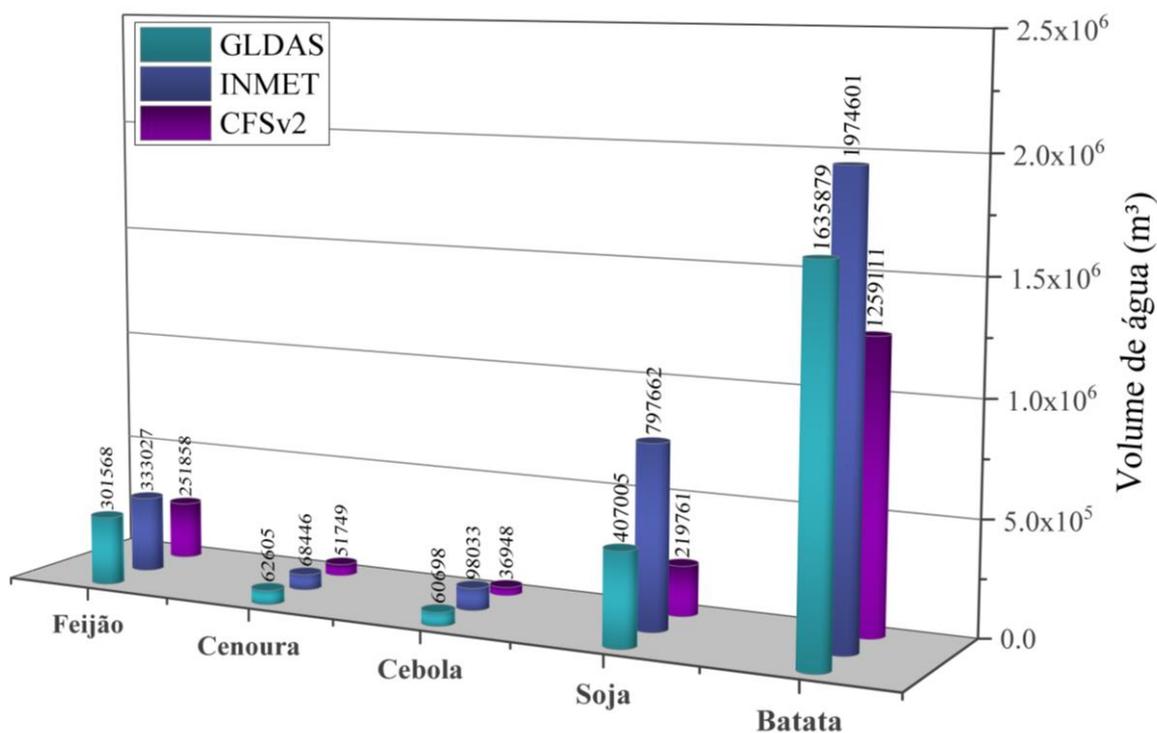
O saldo de irrigação foi positivo para todas as culturas do segundo ciclo, indicando que houve suplementação hídrica. Em termos de consumo médio, a cenoura foi a cultura que apresentou ao maior consumo por área (mm ou L/m²), variando entre 312,3 mm e 236,1 mm, para as fontes de dados INMET e CFSv2, respectivamente. O feijão foi a segunda cultura que mais utilizou água por área, variando entre 198 mm (INMET) e 149,8 mm (CFSv2). A cultura da batata, presente em duas classes, utilizou 185,7 mm (INMET) e 117,4 mm (CFSv2), na classe soja + batata, e 122,8 mm (INMET) e 83,8 mm (CFSv2), na classe milho + batata. Em seguida, a soja, cultivada após o milho, apresentou saldo de irrigação médio de 153,5 mm (INMET) e 57,1 mm (CFSv2). A cultura que apresentou menor consumo médio por área foi a cebola, variando entre 122,6 mm e 46,2 mm, para as fontes INMET e CFSv2, respectivamente.

4.3.3 Volume total de água utilizado

Na Figura 4.9 são apresentados os volumes de água utilizados nos pivôs para as culturas que apresentaram saldo de irrigação positivo no ano agrícola 2015/16. O volume pode também ser entendido como o saldo de irrigação em m³.

Com base na Figura 4.9, pode-se observar que a necessidade de irrigação por pivô central ocorreu em todos os segundos ciclos do ano agrícola analisado, devido à falta de precipitação suficiente no período de desenvolvimento das culturas.

Figura 4.9 – Volume de água utilizado na irrigação por pivô central das culturas que necessitaram de suplementação hídrica no ano agrícola 2015/16 na área de estudo.



Fonte: Produção do autor.

A cultura que mais utilizou água na irrigação foi a batata. O volume utilizado variou entre cerca de 2 milhões de m³, ao utilizar a fonte de dados do INMET, e 1,3 milhões de m³, ao utilizar a fonte CFSv2. É importante destacar que, embora a batata não tenha apresentado os maiores valores do saldo de irrigação foi a cultura que apresentou maior área plantada (Figura 4.5).

A segunda cultura que mais utilizou água foi a soja, com valores entre 220 mil m³ (CFSv2) e 800 mil m³ (INMET), representando também a maior variação da estimativa do volume

entre as fontes de dados (72%). Em seguida, as maiores variações foram obtidas para a cultura da cebola (62%) e batata (36%). Este resultado destaca a importância da realização de estudos que avaliem a acurácia das fontes de dados utilizadas pelo modelo na estimativa das variáveis meteorológicas no Brasil, para se obter melhores estimativas do uso da água na agricultura.

O volume de água utilizado no feijão variou entre 252 mil m³ (CFSv2) e 333 mil m³ (INMET). A cultura da cenoura, embora tenha apresentado os maiores saldos de irrigação (Figura 4.8), utilizou entre 52 mil m³ de água (CFSv2) e 68 mil m³ (INMET) devido a proporção de área plantada no município. Por fim, a cultura da cebola utilizou entre 37 mil m³ (CFSv2) e 98 mil m³ (INMET).

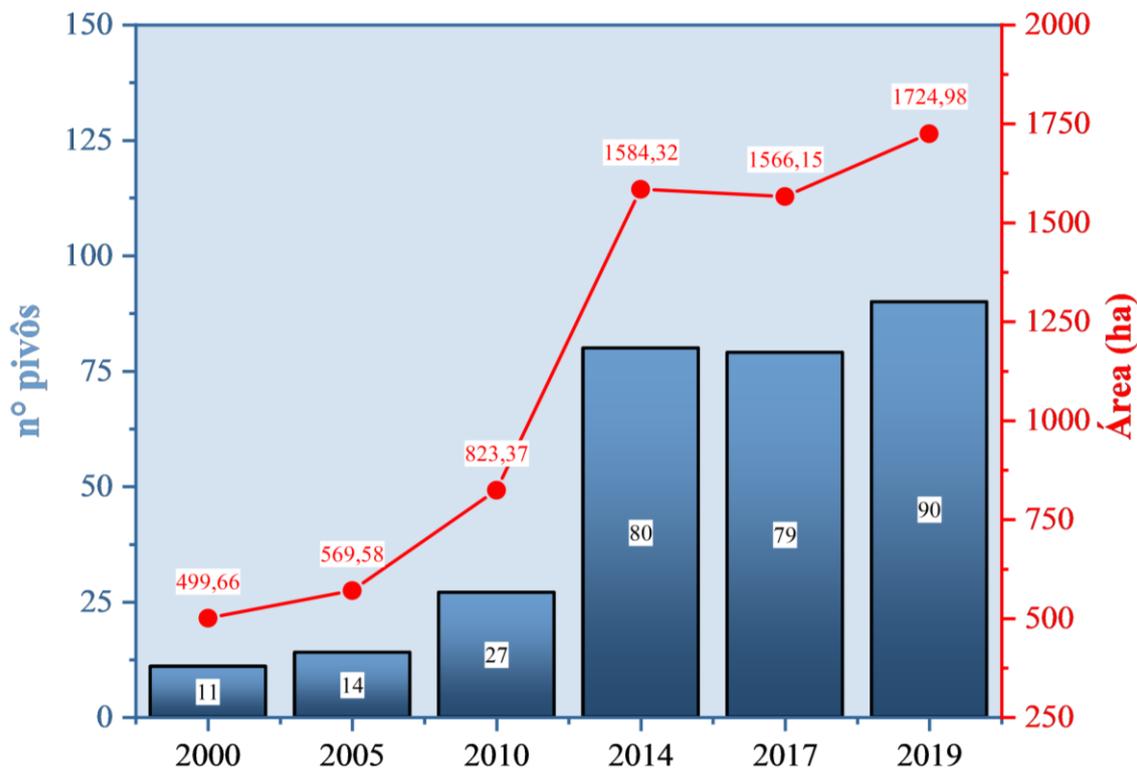
O volume total de água utilizado por pivôs centrais no município de Itobi-SP, durante o ano agrícola de 2015/16, foi igual a 3,2 milhões m³ (INMET), 2,5 milhões m³ (GLDAS) e 1,8 milhões m³ (CFSv2), para as diferentes fontes de dados. A Figura 4.10 apresenta o número e a área irrigada por pivôs centrais na área de estudo no período de 2000 a 2019, a partir do Levantamento da Agricultura Irrigada por Pivôs Centrais, realizado pela ANA (ANA, 2019). Entre 2000 e 2019, a área irrigada por pivô central no município aumentou 245 %, e o número de pivô aumentou em 718%. O mapeamento de pivôs que serviu de base para o presente estudo foi o de 2014. Entre 2014 e 2019 houve um aumento de cerca de 9% na área plantada e 13% no número de pivôs.

A área de estudo está contida no polo de irrigação Vertentes do Rio Pardo e Mogi Guaçu, que é considerado um dos polos com maior potencial de expansão. No entanto, já foi descrito que esta região apresenta alta demanda hídrica e é propensa a conflitos do uso da água (SILVEIRA et al., 2013; COMITÊ DA BACIA DO PARDO, 2005).

De acordo com o Comitê de Bacia do Rio Pardo (2021), somente em 2020 houve um aumento de 13 barramentos para irrigação no município de Itobi-SP. O aumento no número de barramentos é devido, principalmente, à existência de restrições da disponibilidade hídrica para captações diretas nos cursos d'água da região. Embora, a região possua um potencial de crescimento da área irrigada, este crescimento deve levar em consideração a situação atual dos recursos hídricos na região, pois a expansão da agricultura irrigada em áreas em situação de vulnerabilidade entre a oferta e demanda dos recursos hídricos e baixa implementação dos instrumentos da Política Nacional de

Recursos Hídricos aumenta o risco de falta de água em determinado período do ano. Em anos de variações do regime hidrológico, a falta de água pode causar tensões entre os usuários e provocar conflitos do uso da água entre os setores usuários (ANA, 2021).

Figura 4.10 – Área e número de pivôs centrais no município de Itobi-SP no período de 2000 e 2019.



Fonte: Produção do autor.

Como já observado, boa parte do volume de água utilizado na irrigação foi empregado no cultivo de hortaliças. O cultivo de hortaliças no Brasil é baseado principalmente em práticas convencionais de cultivo, caracterizados pelo revolvimento do solo e pela não manutenção da palhada. Fontes et al. (2007) afirmam que o plantio direto ainda não é realizado em escala comercial no cultivo da batata, sendo ainda comum o uso de gradagens, arados e enxadas rotativas, ou seja, um revolvimento intenso do solo. Fernandes et al. (2006) reportaram que as máquinas disponíveis no mercado são projetadas para utilização em solos preparados e livres de restos de culturas na superfície (palhada). O preparo do solo também é utilizado no cultivo da cenoura, no qual o plantio deve ocorrer após o processo de aração profunda seguida de uma ou duas gradagens (EMBRAPA, 2021).

A palhada atua principalmente durante os estágios iniciais dos cultivos, nos quais a perda de água para atmosfera (ET) se dá, principalmente, em função da evaporação da água no solo (STONE; MOREIRA, 2000). Segundo Allen et al. (1998), uma cobertura de 50% de palhada no solo reduz a ET da cultura em 25% nos estágios iniciais, e entre 5 e 10% quando a cultura está em pleno vigor vegetativo.

Marouelli et al. (2006) apontaram uma redução de 19% na irrigação da cebola quando cultivadas em sistema de plantio direto (com palhada) no Cerrado. Marouelli et al. (2010) apontaram uma redução de 13% na lâmina de irrigação na cultura do repolho cultivado, em sistema de plantio direto. Portanto, a adoção de práticas conservacionistas no cultivo de hortaliças reduz a ET das culturas e, conseqüentemente, reduz a lâmina de irrigação a ser aplicada.

5 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi estimar a área e o volume de água utilizado em culturas agrícolas irrigadas por pivô central, para o ano agrícola de 2015/16 em uma região no município de Itobi-SP, usando séries temporais de ETa e o mapeamento das culturas, a partir de métricas fenológicas extraídas de séries temporais densas de índice de vegetação (EVI) obtidas dos satélites *Landsat 7* e *8*.

O uso de métricas fenológicas extraídas de séries temporais de EVI foi eficaz na classificação de cultura dentro da máscara de pivôs centrais. Para todas as classes o f1-score foi superior a 0,9. A classe que apresentou maior área foi Soja + Batata (802,1 ha), seguida das classes Soja (393,9 ha), Milho + Soja, Milho + Batata (153,7 ha), Milho + Feijão (142,9 ha), Milho + Cebola (67,9 ha) e Milho + Cenoura (18,6 ha).

As informações referentes ao ciclo fenológico das culturas, como início, final e duração do ciclo foram usadas nas estimativas do uso da água em culturas irrigadas. Isto permite inferir o período em que a cultura realmente esteve em campo. Dentre os poucos trabalhos sobre estimativa do volume de água na agricultura em grandes áreas, normalmente, utilizam intervalos de tempo fixos nos quais são realizadas as análises.

As culturas referentes ao primeiro ciclo das classes apresentaram saldos de irrigação negativos, exceto a classe de milho precedido da soja, que apresentou valores de até 19,9 mm de saldo e da cultura da soja cultivada em ciclo único, que apresentou valores de até 44,5 mm. O saldo de irrigação negativo indica que a precipitação supriu a demanda de água nas culturas. No entanto, se os pivôs foram ativados para suplementar a necessidade hídrica causadas por veranicos, não foi possível quantificar o uso nesses casos. As culturas referentes ao segundo ciclo apresentaram saldos de irrigação positivos em todos os casos, indicando que houve suplementação hídrica pelos pivôs, o que era esperado devido ao fato que o plantio dessas culturas não foi no período chuvoso.

Em relação ao consumo médio por área, a cenoura foi a cultura que apresentou ao maior consumo por, variando entre 312,3 mm e 236,1 mm, para as fontes de dados INMET e CFSv2, respectivamente. O feijão foi a segunda cultura que mais utilizou água por área, variando entre 198 mm (INMET) e 149,8 mm (CFSv2). A cultura da batata, presente em duas classes, utilizou 185,7 mm (INMET) e 117,4 mm (CFSv2), na classe soja + batata, e 122,8 mm (INMET) e 83,8 mm (CFSv2), na classe milho + batata. Em seguida, a soja,

cultivada após o milho, apresentou saldo de irrigação médio de 153,5 mm (INMET) e 57,1 mm (CFSv2). A cultura que apresentou menor consumo médio por área foi a cebola, variando entre 122,6 mm e 46,2 mm, para as fontes INMET e CFSv2, respectivamente.

Em relação ao volume de água utilizado na irrigação, a cultura que mais utilizou foi a batata, variando entre cerca de 2 milhões de m³, ao utilizar a fonte de dados do INMET, e 1,3 milhões de m³, ao utilizar a fonte CFSv2. Em seguida o consumo de água da soja variou entre cerca 220 mil m³ (CFSv2) e 800 mil m³ (INMET). O volume utilizado na cultura do feijão variou entre 252 mil m³ (CFSv2) e 333 mil m³ (INMET). A cultura da cenoura utilizou entre 52 mil m³ de água (CFSv2) e 68 mil m³ (INMET). Embora a cenoura tenha apresentado o maior consumo médio por área, foi a cultura que apresentou a menor área plantada, o que refletiu no volume de água utilizado na irrigação. Por fim, a cultura da cebola utilizou entre 37 mil m³ (CFSv2) e 98 mil m³ (INMET).

O volume total de água utilizado por pivôs centrais no município de Itobi-SP durante o ano agrícola de 2015/16 foi igual a 3,2 milhões de m³ ao utilizar a fonte de dados INMET, 2,5 milhões de m³ utilizando a fonte GLDAS e 1,8 milhões de m³ utilizando a fonte CFSv2. Foi observada variação até 72% para uma mesma cultura durante a estimativa dos volumes de água a depender das fontes de dados meteorológicos utilizada para cálculo da ETa.

Devido às diferenças nos valores estimados para cada fonte de dados do modelo SSEBop-Br, recomenda-se a avaliação da acurácia das fontes para saber qual fonte permite a obtenção de estimativas mais próximas com as observadas em campo. De forma complementar, recomenda-se a obtenção de dados de ETa em campo para correlacionar com os resultados obtidos pelo modelo SSEBop-Br, realizando uma validação a nível nacional e em diferentes condições edafoclimáticas.

Até onde temos conhecimento, este trabalho configura-se como o primeiro, no Brasil, a realizar a estimativa de volume de água utilizado na irrigação por meio de séries temporais de imagens de ETa, baseada em tecnologias de sensoriamento remoto, levando em conta a dinâmica da agricultura irrigada por meio de métricas fenológicas dos ciclos observados em cada pivô central analisado.

A metodologia proposta neste trabalho pode ser aplicada em outras regiões, aproveitando as classificações já existentes, visando o entendimento do uso da água por culturas diferentes das analisadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. 2. ed. Brasília: ANA, 2021. 130 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Estimativa de evapotranspiração real sensoriamento remoto no Brasil**. Brasília: ANA, 2020. 41 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil**. Brasília: ANA, 2019. 49 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Polos nacionais de agricultura irrigada**. Brasília: ANA, 2020, 26 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA); INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Colaboração ANA-INPE para o Atlas Irrigação 2021: monitoramento de pivôs centrais nos polos de agricultura irrigada do Cerrado**, Brasília: ANA; INPE, 2021, 20 p.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)— Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, p. 380-394, 2007.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and Drainage Paper 56**. Rome, Italy: FAO, 1998, 300p.
- ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N. The expansion of center-pivot irrigation in the Cerrado biome. **Irriga, Botucatu**, v. 1., n. 1, p. 56-61, 2019.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ALVES, É. S. **Evapotranspiração atual da cultura de soja: modelagem e avaliação da evaporação direta da água do solo**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.

ANGUS, D.E.; WATTS, P.J. Evapotranspiration: how good is the Bowen ratio method? *Agric. Water Manage*, v. 8, p. 133-150, 1984.

ARVOR, D.; JONATHAN, M.; MEIRELLES, M.S.O.P.; DUBREUIL, V.; DURIEUX, L. Classification of MODIS EVI time series for crop mapping in the state of Mato Grosso, *Brazilian International Journal of Remote Sensing*, v. 32, n. 22, p. 7847–7871, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA BATATA (ABBA). **Irrigação na cultura da batata**. Itapetininga: ABBA, 2006. 66 p.

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

BELGIU, M.; DRAGUT, L. Random forest in remote sensing: a review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 114, p. 24-31, 2016.

BENDINI, H. N. **Agricultural land classification based on phenological information from dense time-series Landsat-like images in the Brazilian Cerrado**. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2018.

BENDINI, H. N.; FONSECA, L. M. G.; KÖRTING, T. S.; MARUJO, R. F. B.; SANCHES, I. D.; ARCANJO, J. S. Assessment of a multi-sensor approach for noise removal on Landsat-8 OLI time series using CBERS-4 MUX data to improve crop classification based on phenological features. **Proceedings of the Brazilian Symposium on GeoInformatics**, p. 240–251, 2017.

BENDINI, H. N.; GARCIA FONSECA, L. M.; SCHWIEDER, M. KORTING, T. S.; SANCHES, I. A.; LEITÃO, P. J.; HOSTERT, P. Detailed agricultural land

classification in the Brazilian cerrado based on phenological information from dense satellite image time series. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 2019.

BHATT, R.; HOSSAIN, A. **Concept and consequence of evapotranspiration for sustainable crop production in the era of climate change**. [S.l.]: IntechOpen, 2019, 15p.

BHATT, R.; KUKAL, S. S.; BUSARI, M. A.; ARORA, S.; YADAV, M. International soil and water conservation research sustainability issues on rice: wheat cropping system. **International Soil and Water Conservation Research**, v.4, n. 1, p. 64–74, 2016.

BHATTARAI, N.; WAGLE, P. Recent advances in remote sensing of evapotranspiration. **Remote Sensing**, v. 13, p. 4260- 4270, 2021.

BHATT, R.; KUKAL, S. Soil temperature, evaporation and water tension dynamics at upper vadose during intervening period. **Trens in Biosciences**, v. 8, p. 795- 800, 2015.

BORGES, E.F.; SANO, E.E. Séries temporais de EVI do MODIS para o mapeamento de uso e cobertura vegetal do oeste da Bahia. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, n. 3, p. 526–547, 2014.

BREIMAN, L. Random forests. **Machine Learning**, v. 45, p. 5–32, 2001.

CABRAL, O. M. R.; ROCHA, H. R.; GASH, J. H.; LIGO, M. A. V.; TATSCH, J. D.; FREITAS, H. C.; BRASILIO, E. Water use in a sugarcane plantation. **GCB Bioenergy**, v.4, n. 5, p. 555-565, 2012.

CASASSOLA, A. **Caracterização da atividade agrícola de pivôs centrais por meio de séries temporais de imagens Sentinel-2 para estimativas de uso da água na agricultura irrigada**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2022.

CHA, M.; LI, M.; WANG, X. Estimation of seasonal evapotranspiration for crops in arid regions using multisource remote sensing images. **Remote Sensing**, v. 12, n. 15, 2020.

CHEN, H.; HUO, Z.; DAI, X.; MA, S.; XU, X.; HUANG, G. Agricultural and forest meteorology impact of agricultural water-saving practices on regional evapotranspiration: the role of groundwater in sustainable agriculture in arid and semi-arid areas. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 263, n. 17, p. 156–168, 2018

CHINCHOR, N.; SUNDHEIM, B. MUC-5 evaluation metrics. In: CONFERENCE ON MESSAGE UNDERSTANDING, 5., 1993. **Proceedings...** 1993.

COMITÊ DA BACIA DO PARDO. **Deliberação 009, de 2005, declara crítica a Bacia Hidrográfica do Ribeirão dos Congonhas, afluente da margem esquerda do Rio Pardo, localizada na região de Casa Branca.** São Paulo, SP: CBP, 2005.

COMITÊ DA BACIA DO PARDO. **Relatório de situação dos recursos hídricos da bacia hidrográfica: ano-base 2020**, São Paulo, SP: CBP, 2021. 111 p.

DALIN, C.; TANIGUCHI, M.; GREEN, T.R. Unsustainable groundwater use for global food production and related international trade. **Global Sustainability**, 2019.

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

DAVIS, K.F.; RULLI, M.C.; GARRASSINO, F.; CHIARELLI, D.; SEVESO, A.; D'ODORICO, P. Water limits to closing yield gaps. **Advances in Water Resources**, v. 99, p. 67–75, 2017.

DE LA FUENTE-SÁIZ, D.; ORTEGA-FARÍAS, S.; FONSECA, D.; ORTEGA-SALAZAR, S.; KILIC, A.; ALLEN, R. Calibration of metric model to estimate energy balance over a drip-irrigated apple orchard. **Remote Sensing**, v.9, n. 670, 2017.

DIAZ, M. B.; ROBERTI, D. R.; CARNEIRO, J. V.; SOUZA, V. A.; MORAES, O. L.
L. Dynamics of the superficial fluxes over a flooded rice paddy in southern Brazil.
Agricultural and Forest Meteorology, p. 276-277, 2019.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Bioma Cerrado**. 2015. Disponível em:
http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01_23_911200585232.htm. Acesso em: 15 mar. 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA).
Cenoura- *Daucus Carota* L. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2021. 74 p (Sistemas de Produção, 2).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA).
Conhecendo a fenologia do feijoeiro e seus aspectos fitotécnicos. Brasília, DF: Embrapa Arroz e Feijão, 2018. 59 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA).
Irrigação da cultura da cenoura, 2007. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2007. 14 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA).
Irrigação na cultura da cebola. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2005. 17 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA).
Tecnologias de produção de soja: região Central do Brasil, Londrina, PR: Embrapa Soja, 2007. 9 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA).
Tecnologias de produção de soja: região Central do Brasil, 2001. Londrina: Embrapa Soja, 2002. 199 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA).
Variáveis meteorológicas e estimativas da evapotranspiração num cultivo de soja no Cerrado. Planaltina: Embrapa Soja, 2021. 21 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA).

Viabilidade e manejo da irrigação da cultura do milho. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho, 2006. 12 p.

FERNANDES, H. C.; OLIVEIRA, A. D.; FONTES, P. C. R.; CAMILO, A. J.; RINALDI, P. C. N. Avaliação da cultura da batata instalada por uma plantadora adaptada para trabalhar em sistemas de plantio direto e cultivo mínimo. **Revista Ceres**, v. 53, n. 305, p. 65-73, 2006.

FOKEN, T. The energy balance closure problem: an overview. **Ecological Applications**, v. 18, p.1351–1367, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1890/06-0922.1>.

FOLHES, M. T. **Modelagem da evapotranspiração para a gestão hídrica de perímetros irrigados com base em sensores remotos.** 189 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto). - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2007.

FONTES, P. C. R.; NUNES, J. C. S.; FERNANDES, H. C.; ARAÚJO, F. Características físicas do solo e produtividade da batata dependendo de sistemas de preparo do solo. **Horticultura Brasileira**, v. 25, p. 355-359, 2007.

FUNES, I.; SAVÉ, R.; HERRALDE, F.; BIEL, C.; PLA, E.; PASCUAL, D.; ZABALZA, J.; CANTOS, G.; BORRAS, G.; VAYREDA, J.; ARANDA, X. Modeling impacts of climate change on the water needs and growing cycle of crops in three Mediterranean basins. **Agricultural Water Management**, v. 249, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106797>.

GETIRANA, A. C. V.; MALTA, V. F. Decision process in a water use conflict in Brazil. **Water Resource Manage**, v. 22, p.103-118, 2020.

GLENN, E. P.; HUETE, A. R.; NAGLER, P. L.; HIRSCHBOECK, K. K.; BROWN, P. Integrating remote sensing and ground methods to estimate evapotranspiration. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 26, n. 3, p. 139–168, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/07352680701402503>.

GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18–27, 2017.

GUSSO, A.; FORMAGGIO, A. R.; RIZZI, R.; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T. Soybean crop area estimation by Modis/Evi data. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 3, p. 425-435, 2012

HADDAD, I; GALVÃO, L. S.; BREUNIG, F. M.; DALAGNOL, R.; BOURSCHEIDT, V.; JACON, A. D. On the combined use of phenological metrics derived from different PlanetScope vegetation indices for classifying savannas in Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 26, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100764>.

HARVEY, A. C. **Forecasting, structural time series models and the Kalman filter**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

HOWELL, T. A.; SCHNEIDER, A. D.; JENSEN, M. E. History of lysimeter design and use for evapotranspiration measurements. **Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements**, p. 1–9, 1991.

HOWES, D.J.; FOX, P.; HUTTON, P. H. Evapotranspiration from natural vegetation in the central valley of California: monthly grass reference-based vegetation coefficients and the dual crop coefficient approach. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 20, 2015.

IRMAK, S.; HAMAN, D. Z. **Evapotranspiration: potential or reference?** [S.l.]: IFAS, 2017. 2 p.

JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. TIMESAT – a program for analyzing time-series of satellite sensor data. **Computers and Geosciences**, v. 30, p. 833–845, 2004.

JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. **TIMESAT 3.2 with parallel processing software manual**. Sweden: Lund University, 2015. p. 2.

KAPLAN, S.; MYINT, S. W.; FAN, C.; BRAZEL, A. J. Quantifying outdoor water consumption of urban land use/land cover: sensitivity to drought. **Environmental Management**, v. 53, n. 4, p. 855–864, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00267-014-0245-7>.

KÖRTING, T.S.; FONSECA, L.M.G.; CÂMARA, G. GeoDMA—geographic data mining analyst. **Computers and Geosciences**, v. 57, p. 133–145, 2013.

KUMAR, L.; MUTANGA, O. Google Earth Engine applications since inception: usage, trends, and potential. **Remote Sensing**, v. 10, p. 1509, 2018.

KUSTAS, W. P. Estimates of evapotranspiration with a one-layer and 2-layer model of heat-transfer over partial canopy cover. **Journal of Applied Meteorology**, v. 29, p. 704–715, 1990.

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

LIANG, S.; LI, X.; WANG, J. Terrestrial information extraction and applications. **Journal of Chemical Information and Modeling**, v.1, 2012.

LIU, Y. A.; KAR, S. K. Evapotranspiration estimation with remote sensing and various surface energy balance algorithms-a review. **Energies**, v. 7, n. 5, p. 2821–2849, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en7052821>.

LIU, H.Q.; HUETE, A. Feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 2, p. 457–465, 1995.

LOPES, D. J.; RODRIGUES, L. N.; IMBUZEIRO, H. M. A e PRUSKI, F. F. Performance of SSEBop model for estimating wheat actual evapotranspiration in the Brazilian Savannah region. **International Journal of Remote Sensing**, v. 40, p. 6930-6947, 2019

LUNARDI, D. M. C.; LAPETURA FILHO, J. Evapotranspiração máxima e coeficiente de cultura da cenoura (*Daucus carota* L.) **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 7, n. 1, p. 13-17, 1999

MAROUELLI, W. A.; ABDALLA, T. P.; MADEIRA, N. R.; OLIVEIRA, A. S. Eficiência de uso da água e produção de repolho sobre diferentes quantidades de palhada em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 4, 2010.

MAROUELLI, W.A.; SILVA, H.R.; MADEIRA, N.R. Uso de água e produção de tomateiro para processamento em sistema de plantio direto com palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.1399-1404, 2006.

MARUJO, R.F.B.; FONSECA, L.M.G.; KORTING, T.S.; BENDINI, H.N. A multi-scale segmentation approach to filling gaps in Landsat etm+ slc-off images through pixel weighting. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 42, p. 79–84, 2020.

MATZENAUER, R. Evapotranspiração de plantas cultivadas e coeficientes de cultura. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1992. p. 33-49.

MATZENAUER, R. et al. **Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Fepagro, 2002, 105 p.

MATZENAUER, R.; MALUF, J. R. T.; BUENO, A. C. Evapotranspiração da cultura do feijão e sua relação com a evaporação do tanque classe "A". **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 4, n. 2, p. 101-106, 1998.

McSHANE, R. R.; DRISCOLL, K. P.; SANDO, R. **A review of surface energy balance models for estimating actual evapotranspiration with remote sensing at high spatiotemporal resolution over large extents**. [S.l.]: U.S. Geological Survey, 2017.

MHAWEJ, M.; FAOUR, G. Open-source Google Earth Engine 30-m evapotranspiration rates retrieval: The SEBALIGEE system. **Environmental Modelling and Software**, v. 133, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104845>.

MOURA, M.V.T. et al. Estimativa do consumo de água da cultura da cenoura (*Daucus carota*, L.) v. Nantes Superior, para a região de Piracicaba, através do Balanço Hídrico. **Scientia Agricola**, v. 51, n. 2, p. 284-291, 1994.

NIU, H.; HOLLENBECK, D.; ZHAO, T.; WANG, D.; CHEN, Y. Evapotranspiration estimation with small uavs in precision agriculture. **Sensors** (Switzerland), v. 20, n. 22, p. 1–28, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s20226427>.

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

OLIVEIRA, B. S. **Otimização do modelo Metric para estimativas de evapotranspiração no Cerrado brasileiro**. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

ONISIMO, M.; KUMAR, L. Google Earth Engine applications. **Remote Sensing**, v.11, 2019.

PAULA, A. C. P.; SILVA, C. L.; RODRIGUES, L. N.; SCHERERWARREN, M. Performance of the SSEBop model in the estimation of the actual evapotranspiration of soybean and bean crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 54, 2019.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical. Physical and Engineering Sciences**, v. 193, n.1032, p.120–145, 1948. Doi: 0.1098/rspa.1948.0037.

RADIN, B. **Evapotranspiração máxima do milho medida em lisímetro e estimada pelo modelo de Penman-Monteith modificado**. 1998. 96f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

RAHMAN, M. M.; ZHANG, W. Review on estimation methods of the Earth's surface energy balance components from ground and satellite measurements. **Journal of Earth System Science**, v. 128, n. 4, p. 1–22, 2019. Disponível em:

<https://doi.org/10.1007/s12040-019-1098-5>.

REIS, T.; RUSSO, G.; RIBEIRO, V.; MOUTINHO, P.; GUIMARÃES, A.; STABILE, M.; IPAM. **Climate challenges and opportunities in the Brazilian Cerrado**. 2017.

Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0022146512469014>.

ROERINK, G.; SU, Z.; MENENTI, M. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. **Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere**, v. 25, p. 147-157, 2000.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE SYMPOSIUM, 1973, Washington. **Proceedings...** Washington: NASA, 1973. p.309-317.

RUDORFF, B.F.T.; AGUIAR, D.A.; SILVA, W.F.; SUGAWARA, L.M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M.A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using landsat data. **Remote Sensing**, v. 2, p. 1057–1076, 2010.

SCHAUER, M.; SENAY, G. B. Characterizing crop water use dynamics in the Central Valley of California using Landsat-derived evapotranspiration. **Remote Sensing**, v. 11, n. 15, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs11151782>.

SCHIRMBECK, J.; FONTANA, D. C.; ROBERTI, D. R. Evaluation of OSEB and SEBAL models for energy balance of a crop area in a humid subtropical climate. **Bragantia**, v. 77, p. 609–621, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-4499.2017208>.

SCHWIEDER, M.; LEITÃO, P.J.; BUSTAMANTE, M.M.C.; FERREIRA, L.G.; RABEA, A.; HOSTERT, P. Mapping Brazilian savanna vegetation gradients with Landsat time series. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 2, p. 361–370, 2016.

SENAY, G. B. Satellite Psychrometric Formulation of the Operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop): model for quantifying and mapping evapotranspiration. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 34, n. 3, p. 555–566, 2018.

SENAY, G. B.; BOHMS, S.; SINGH, R. K.; GOWDA, P. H.; VELPURI, N. M.; ALEMU, H.; VERDIN, J. P. Operational evapotranspiration mapping using remote sensing and weather datasets: a new parameterization for the SSEB approach. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 49, n. 3, p. 577–591, 2013.

Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jawr.12057>.

SENAY, G. B.; BUDDE, M.; VERDIN, J. P.; MELESSE, A. M. A coupled remote sensing and simplified surface energy balance approach to estimate actual evapotranspiration from irrigated fields. **Sensors**, v. 7, n. 6, p. 979–1000, 2007.

Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s7060979>.

SENAY, G. B.; FRIEDRICHS, M.; SINGH, R. K.; VELPURI, N. M. Evaluating Landsat 8 evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River Basin.

Remote Sensing of Environment, v. 185, p. 171–185, 2016. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.043>.

SENAY, G. B.; SCHAUER, M.; FRIEDRICHS, M.; VELPURI, N. M.; SINGH, R. K. Satellite-based water use dynamics using historical Landsat data (1984–2014) in the southwestern United States. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 98–112,

2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.005>.

SETZER, J. **Atlas climatológico e ecológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: Comissão Interestadual da Bacia Paraná-Uruguai, 1966. 61 p.

SILVEIRA, J. M. C. et al. Identificação de áreas irrigadas por pivô central utilizando imagens CCD/CBERS. In: CONGRESO LATINOAMERICANO Y DEL CARIBE DE INGENIERÍA AGRÍCOLA, 9., 2010, Vitória/ES. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2010.

SILVEIRA, J. M. C.; LIMA JÚNIOR, S.; SAKAI, E.; MATSURA, E. E.; PIRES, R. C. M.; ROCHA, A. M. Identificação de áreas irrigadas por pivô central na sub-bacia

Tambaú-Verde utilizando imagens CCD/CBERS. **IRRIGA**, v.18, n. 4, p. 721–729, 2013. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/684>.

SINGH, R. K.; LIU, S.; TIESZEN, L. L.; SUYKER, A. E.; VERMA, S. B. Estimating seasonal evapotranspiration from temporal satellite images. **Irrigation Science**, v. 30, n. 4, p. 303–313, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0287-z>.

SOARES, A. R.; BENDINI, H. N.; VAZ, D. V.; UEHARA, T. D. T.; NEVES, A. K.; LECHLER, SARAH; KORTING, T. S.; FONSECA, L. M. G. STMETRICS: A Python package for satellite image time-series feature extraction. In: IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), 2020. **Proceedings...** IEEE, 2020.

STONE, L.F.; MOREIRA, J.A.A. Efeitos de sistemas de preparo do solo no uso da água e na produtividade do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.835-841, 2000.

TANG, R.; LI, Z. L.; JIA, Y.; LI, C., CHEN, K. S.; SUN, X.; LOU, J. Evaluating one- and two-source energy balance models in estimating surface evapotranspiration from Landsat-derived surface temperature and field measurements. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34 p. 9–10, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.716529>.

TATSCH, J.D. **Uma análise dos fluxos de superfície e do microclima sobre cerra, cana-de-açúcar e eucalipto, com implicações para mudanças climáticas regionais.** Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

TWINE, T. E.; KUSTAS, W. P.; NORMAN, J. M.; COOK, D. R.; HOUSER, P. R.; MEYERS, T. P.; PRUEGER, J. H.; STARKS, P. J.; WESELY, M. L. Correcting eddycovariance flux underestimates over a grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.103, n. 3, p. 279-300, 2000.

VICTORIA, D. C.; PAZ, A. R. COUTINHO, A. C.; KASTENS, J.; BROWN, J. C. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.9, p. 1270-1278, 2012.

WALTER, I. A. et al. **ASCE's standardized reference evapotranspiration equation.** [S.l.]: Watershed Management and Operations Management, 2000. p. 1-11.

WANNIARACHCHI, S.; SARUKKALIGE, R. A Review on evapotranspiration estimation in agricultural water management: past, present, and future 2022.

Hydrology, v. 9, n. 123, 2022. Disponível em:

<https://doi.org/10.3390/hydrology9070123>.

XAVIER, A. C.; KING, C. W. e SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980– 2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, p. 2644–2659, 2016.

XU, C.; GONG, L.; JIANG, T.; CHEN, D.; SINGH, V. P. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment. **Journal of Hydrology**, v. 327, p. 81-93, 2006.

YASSEN, A. N.; NAM, W. H.; HONG, E. M. Impact of climate change on reference evapotranspiration in Egypt. **Catena**, p. 194, 2020. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104711>.