

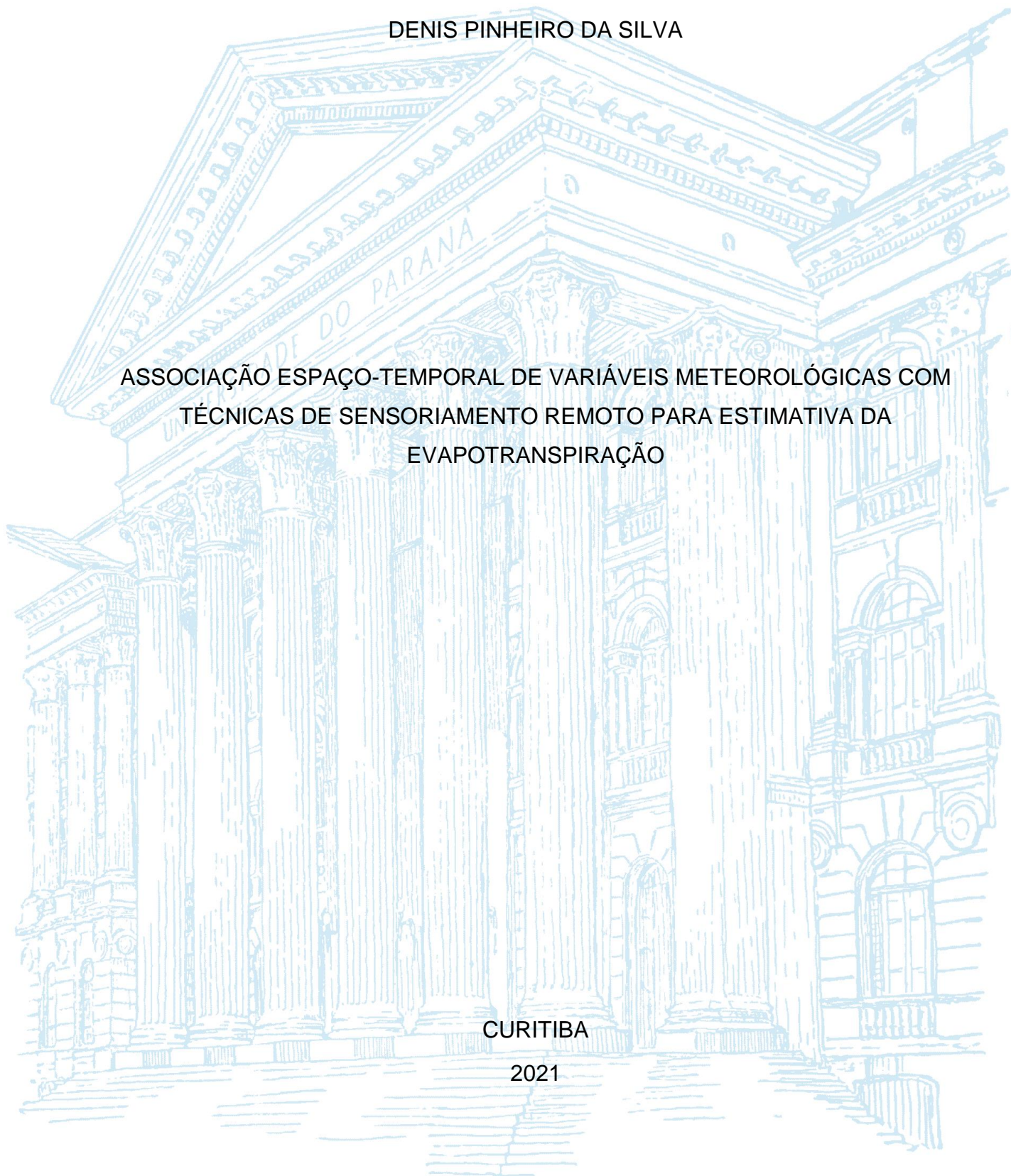
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DENIS PINHEIRO DA SILVA

ASSOCIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS COM
TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA ESTIMATIVA DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO

CURITIBA

2021



DENIS PINHEIRO DA SILVA

ASSOCIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS COM
TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA ESTIMATIVA DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza.

CURITIBA

2021

Silva, Denis Pinheiro da

Associação espaço-temporal de variáveis meteorológicas com técnicas de sensoriamento remoto para estimativa da evapotranspiração. - Curitiba, 2021.

174f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza

1. Ciência do Solo - modelagem. 2. Temperatura de superfície. 3. Umidade relativa. I. Souza, Jorge Luiz Moretti de. II. Título III. Universidade Federal do Paraná.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIA DO SOLO -
40001016014P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIA DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **DENIS PINHEIRO DA SILVA** intitulada: **ASSOCIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS COM TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO**, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 26 de Agosto de 2021.

Assinatura Eletrônica
31/08/2021 13:14:52.0
JORGE LUIZ MORETTI DE SOUZA
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
31/08/2021 13:23:32.0
JAIRO CALDERARI DE OLIVEIRA JUNIOR
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
31/08/2021 11:03:06.0
CLAUDINEI TABORDA DA SILVEIRA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ -
PPGGEOGRAFIA)

Assinatura Eletrônica
31/08/2021 11:51:00.0
RODRIGO YOITI TSUKAHARA
Avaliador Externo (FUNDAÇÃO ABC)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus em primeiro lugar, por ter me concedido a oportunidade de sair da minha cidade, Belém do Pará, e ter vindo à Curitiba ampliar meus conhecimentos, e também por nunca ter deixado faltar nada durante essa jornada com minha querida esposa. Sou eternamente grato ao senhor.

A minha mulher que nunca mediu esforços para me ajudar durante esse período de grande aprendizado e de muita luta também. Agradeço aos meus pais, que mesmo de longe, sentia que estavam perto me apoiando em tudo. Agradeço a minha vó também, que está sempre torcendo por mim e ajudando.

Ao Grupo de Pesquisa do Laboratório de Modelagem dos Sistemas Agrícolas, Jocelito, Stefanie, Jessica, Aline, Felipe, que me receberam no momento que cheguei a UFPR. Também ao professor Moretti, que com muita paciência e dedicação decidiu me orientar, obrigado por depositar confiança em mim.

Agradeço em fim ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo (PPGCS), da Universidade Federal do Paraná (UFPR), por me conceder a oportunidade do mestrado e ao CNPq pela oportunidade da bolsa, sem a qual jamais teria vindo de tão longe para me especializar e tornar um profissional melhor. Foi um a experiência incrível.

RESUMO

Teve-se por objetivo no presente estudo: *i)* Propor, testar e avaliar um método simplificado para estimar a evapotranspiração de referência (ET_o) espacializada, baseando-se na associação de imagens de satélite e variáveis climáticas medidas em estações meteorológicas; e *ii)* Avaliar a variabilidade espacial da ET_o diária na Bacia Hidrográfica do Rio Tibagi (BHRT), estimada com dados remotos, considerando eventos ENOS (*El Niño*, *La Niña* e Normalidade climática), bem como estimar a ET_o na mesma bacia no intervalo entre imagens do satélite Landsat, utilizando algoritmo interpolador temporal. O trabalho foi estruturado em três capítulos: Capítulo I – Referencial teórico indicando a importância da estimativa espacial da evapotranspiração, com descrição dos aspectos técnicos e teóricos para subsidiar as discussões e metodologias do trabalho; Capítulo II – Avaliação das estimativas das temperaturas da superfície (T_s) e coluna total de vapor d'água precipitável (W_p), obtidas com imagem dos satélites Landsat 8 e Aqua MODIS, associadas em análises de regressão linear simples e múltipla com a temperatura e umidade relativa média do ar, respectivamente, medidas em estações meteorológicas. As equações de ajuste foram calibradas e validadas com dados diferentes. Estimativas da ET_o com modelos alternativos utilizando dados meteorológicos espacializados de temperatura e umidade relativa foram comparados com a ET_o estimada com o modelo Penman Monteith ASCE. As variáveis espaciais T_s e W_p estimaram a temperatura ($T_{e_{SR}(W_p;T_s)}$; $r = 0,87$) e umidade relativa ($UR_{e_{SR}(W_p;T_s)}$; $r = 0,41$) do ar baseadas em sensoriamento remoto com desempenho satisfatório. O modelo Moretti-Jerszurki-Silva (MJS; $ET_{o_{MJS}(Ra; \psi_{ar})}$) apresentou desempenho satisfatório estatisticamente para estimar a ET_o ; Capítulo III – Avaliação da ET_o estimada com modelo MJS, com entrada de variáveis espacializadas (temperatura e umidade relativa do ar) obtidas com modelo de regressão linear múltiplo na BHRT. A variabilidade espacial foi avaliada nas quatro estações do ano, com o uso de imagens de satélite, considerando os anos: 2011 (*La Niña*), 2013 (normal) e 2015 (*El Niño*). A variabilidade temporal da $ET_{o_{MJS}(\psi_{ar}; Ra)}$ foi testada com interpolação linear no período entre imagens do satélite Landsat 8, com algoritmo interpolador temporal "*r.series.interp*" disponível no software Qgis 3.10. A associação entre as ET_o estimadas com metodologias padrão (Penman-Monteith ASCE - $ET_{o_{PM}}$) e alternativa (MJS; $ET_{o_{MJS}(\psi_{ar}; Ra)}$) foram avaliados estatisticamente com: NSE , d , $RMSE$, $ERPAM_{\%}$ e r . Observou-se diferença da $ET_{o_{MJS}(\psi_{ar}; Ra)}$ média espacializada na estações do ano entre os cenários Normal e *El Niño* ($0,36 \text{ mm dia}^{-1}$) e entre os cenários Normal e *La Niña* ($0,34 \text{ mm dia}^{-1}$). O algoritmo interpolador apresentou precisão aceitável, mas distante do valor de referência $ET_{o_{PM}}$. O modelo MJS utilizando variáveis baseadas em sensoriamento remoto obteve desempenho satisfatório, e o interpolador temporal linear apresentou estimativa aceitável da $ET_{o_{MJS}(\psi_{ar}; Ra)}$ diária espacializada, considerando a sua simplicidade.

Palavras-chave: Modelagem. Calibração. Validação. Temperatura. Umidade Relativa. Landsat. MODIS.

ABSTRACT

The objective of this study was: *i*) To propose, test and evaluate a simplified methodology to estimate the spatialized reference evapotranspiration (ET_o), based on the association of satellite images and climate variables measured in meteorological stations; and *ii*) Evaluate the spatial variability of the daily ET_o in the Tibagi River Basin (TRB), estimated with remote data, considering ENSO events (*El Niño*, *La Niña* and Climatic Normality), as well as estimate the ET_o in the same basin in the interval between images of the Landsat satellite, using the temporal interpolation algorithm. The work was structured in three chapters: Chapter I – Referential theoretical indicating the importance of the spatial estimation of evapotranspiration, with description of the technical and theoretical aspects to support the discussions and methodologies of work; Chapter II – Evaluation of the surface temperature estimates (T_s) and total column of precipitable water vapor (W_p), obtained with images from the Landsat 8 and Aqua MODIS satellites, associated with simple and multiple linear regression analysis with temperature and relative humidity air average, respectively, measured at meteorological stations. Single and multiple adjustment equations were calibrated and validated with different data. ET_o estimates with alternative models using spatialized climate data of temperature and relative humidity, were compared with the ET_o estimated with the Penman Monteith ASCE model. The spatial variables T_s and W_p estimated the temperature ($Te_{SR(W_p;T_s)}$; $r = 0.87$) and relative humidity ($UR_{eSR(W_p;T_s)}$; $r = 0.41$) of the air based on remote sensing with performance satisfactory. The Moretti-Jerszurki-Silva model (MJS, $ET_{oMJS(\psi_{ar};Ra)}$) presents a statistically satisfactory performance to estimate the ET_o ; Chapter III – ET_o assessment estimated with MJS model, with input of specialized variables (temperature and relative humidity of the air) obtained with multiple linear regression model in TRB. Spatial variability was evaluated in the four seasons of the year, using satellite images, in climate scenarios considering the years: 2013 (Normal), 2015 (*El Niño*) and 2011 (*La Niña*). The temporal variability of $ET_{oMJS(\psi_{ar};Ra)}$ was tested with linear interpolation in the period between images from the Landsat 8 satellite, with the temporal interpolation algorithm “*r.series.interp*” available in the Qgis 3.10 software. The association between ET_o estimated with standard (Penman-Monteith ASCE – ET_{oPM}) and alternative (MJS; $ET_{oMJS(\psi_{ar};Ra)}$) methodologies were statistically evaluated with: NSE , d , $RMSE$, $ERPAM\%$ and r . It was observed difference $ET_{oMJS(\psi_{ar};Ra)}$ on the average spatialized seasons settings between Normal and *El Niño* (0.36 mm d^{-1}) and between Normal and *La Niña* scenarios (0.34 mm day^{-1}). The interpolator algorithm has acceptable precision, but far from the reference value ET_{oPM} . The MJS model using variables based on remote sensing achieved satisfactory performance, and the resulting linear temporal interpolator acceptable estimate of the spatialized daily $ET_{oMJS(\psi_{ar};Ra)}$, considering its simplicity.

Keywords: Modeling. Calibration. Validation. Temperature. Relative Humidity. Landsat. MODIS.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Segue abaixo a relação e descrição das principais abreviaturas e símbolos das terminologias ou variáveis que foram utilizadas no texto da dissertação. Não são todas abreviaturas e símbolos, somente aqueles que se encontram no texto isoladamente distantes de sua descrição.

$ERPAM_{\%}$ – Erro relativo percentual absoluto médio.

ET_{oC} – Evapotranspiração de referência estimada com o modelo de Camargo (1971) (mm dia^{-1});

$ET_{oMJS(Ra; \psi_{ar})}$ – Evapotranspiração de referência estimada com o modelo Moretti-Jerszurki-Silva (mm dia^{-1}), tendo como variáveis a radiação solar no topo da atmosfera e o potencial hídrico atmosférico;

$ET_{oMJS(\psi_{ar}; Ra)_{int}}$ – Evapotranspiração de referência estimada com o modelo Moretti-Jerszurki-Silva (mm dia^{-1}), tendo como variáveis a radiação solar no topo da atmosfera e o potencial hídrico atmosférico, interpolado temporalmente com algoritmo linear;

ET_{oPM} – Evapotranspiração de referência estimada com o modelo Penman-Monteith ASCE (mm dia^{-1});

$ET_{oTW.dc}$ – Evapotranspiração de referência estimada com o modelo de Thornthwaite (1948), corrigido para valores diários (mm dia^{-1});

ET_o – Evapotranspiração de referência diária (mm dia^{-1});

NSE – Índice de eficiência de *Nash-Sutcliffe*;

$RMSE$ – Raiz do erro quadrático médio;

Te_{SR} – Temperatura do ar estimada com sensoriamento remoto ($^{\circ}\text{C}$);

Tm_{EM} – Temperatura média do ar medida em estação meteorológica ($^{\circ}\text{C}$);

T_s – temperatura da superfície terrestre ($^{\circ}\text{C}$);

UR_{eSR} – Umidade relativa do ar estimada com sensoriamento remoto (%);

URm_{EM} – Umidade relativa média do ar medida em estação meteorológica (%);

Wp – Coluna total de vapor d'água precipitável (cm);

d – Índice de concordância “*d*”;

r – Coeficiente de correlação de Pearson (adimensional).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	10
1.1	CAPÍTULO I – REFERENCIAL TEÓRICO	12
1.1.1	Sensores orbitais passivos imageadores	12
1.1.2	Produtos estimados com sensoriamento remoto	16
1.1.3	Evapotranspiração de referência (<i>ET_o</i>)	17
1.1.4	Espacialização da evapotranspiração de referência (<i>ET_o</i>)	19
1.1.5	Influência de eventos ENOS no regime hídrico	21
1.1.6	Fusão de dados de sensoriamento remoto	21
	REFERÊNCIAS	23
2	CAPÍTULO II – ASSOCIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E IMAGENS DE SATÉLITE PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TIBAGI, ESTADO DO PARANÁ.....	32
2.1	RESUMO	32
2.2	ABSTRACT	33
2.3	INTRODUÇÃO	34
2.4	MATERIAL E MÉTODOS	36
2.4.1	Descrição da área de estudo	36
2.4.2	Registros Meteorológicos	37
2.4.3	Imagens de satélite	38
2.4.4	Calibração e validação da temperatura e umidade relativa do ar estimada com sensoriamento remoto	39
2.4.5	Estimativa das variáveis climáticas com dados de sensoriamento remoto .	41
2.4.6	Estimativa da evapotranspiração de referência (<i>ET_o</i>)	44
2.4.7	Validação da <i>ET_o</i> estimada com sensoriamento remoto	47
2.4.8	Análise estatística	47
2.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
2.5.1	Caracterização climática e fisiográfica da BHRT	49
2.5.2	Calibração dos modelos lineares simples e múltiplo	52
2.5.3	Validação dos modelos lineares simples e múltiplo	56
2.5.4	Estimativa da evapotranspiração de referência (<i>ET_o</i>)	59
2.6	CONCLUSÕES	62
	REFERÊNCIAS	63

3	CAPÍTULO III – VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ESTIMADA COM IMAGENS DE SATÉLITES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TIBAGI, ESTADO DO PARANÁ, BRASIL	70
3.1	RESUMO	70
3.2	ABSTRACT	71
3.3	INTRODUÇÃO	72
3.4	MATERIAL E MÉTODOS	74
3.4.1	Descrição da área de estudo	74
3.4.2	Estimativa da $ET_{oMJS(Ra;\psi ar)}$ com modelo linear múltiplo	75
3.4.3	Variabilidade espacial da $ET_{oMJS(\psi ar;Ra)}$	77
3.4.4	Variabilidade temporal da ET_o	80
3.4.5	Análise estatística	82
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	84
3.5.1	Variabilidade espacial da $ET_{oMJS(\psi ar;Ra)}$ na BHRT	84
3.5.2	Variabilidade temporal da $ET_{oMJS(\psi ar;Ra)}$	92
3.5.3	Validação das estimativas da $ET_{oMJS(\psi ar;Ra)_{int}}$	96
3.6	CONCLUSÕES	100
	REFERÊNCIAS	100
4	CONCLUSÕES GERAIS	108
5	REFERÊNCIAS GERAIS	109
	APÊNDICE 1 – SCRIPT EM LINGUAGEM PYTHON PARA TRANSFORMAR IMAGENS DO SATÉLITE AQUA/MODIS NO FORMATO “.hdf” PARA “.geotiff”	125
	APÊNDICE 2 – DADOS MEDIDOS EM ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS E COM SENSORIAMENTO REMOTO, PARA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DAS VARIÁVEIS Te_{SR} E UR_{eSR} E ET_o ESTIMADA	128
	APÊNDICE 3 – MÓDULOS PROCESSAMENTO NO SOFTWARE QGIS, PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE ESTIMATIVA DE ET_o ESPACIALIZADA	139
	APÊNDICE 4 – ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA COM O MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH ASCE (ET_{oPM})	163
	APÊNDICE 5 – VALORES MENSIS DE TEMPERATURA MÉDIA (T) E UMIDADE RELATIVA MÉDIA (UR) DO AR, PRECIPITAÇÃO E NÚMERO DE DIAS AVALIADOS NAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS ANALISADAS, PARA TODOS OS DIAS NO PERÍODO ENTRE 2014 E 2018, NA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIBAGI (BHRT), E NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DOS CLIMAS DAS ESTAÇÕES	169

1 INTRODUÇÃO GERAL

A literatura é rica em estudos envolvendo a mensuração e estimativa da evapotranspiração (*ET*). Dentre os métodos de medida se destacam os evapotranspirômetros e lisímetros (Tyagi et al., 2000; Bakhtiari et al., 2006; Benli et al., 2006). As estimativas podem ser realizadas com equações físicas, como Penamn-Monteith (ASCE-EWRI, 2005), ou empíricas (Chiew et al., 1995; Alexandris e Kerkides, 2003; Allen et al., 2006; López-Urrea et al., 2006; Moura et al., 2010). Os métodos que medem a *ET* têm a vantagem de expressarem a realidade local, mas a instalação e calibração dos equipamentos são complexas e apresentam baixa representatividade da variabilidade espacial.

Medidas pontuais da *ET*, determinadas com métodos convencionais (sensores de água no solo, evapotranspirômetros, lisímetros, estações meteorológicas), podem não representar as medidas no espaço ao seu redor, limitando a obtenção da variabilidade dos dados de evapotranspiração, principalmente em estudos de grandes bacias hidrográficas (Althoff et al., 2019). Com a evolução da tecnologia, satélites como Landsat e Terra/Aqua (equipados com o sensor MODIS) tem sido alternativa para estudos envolvendo a estimativa da *ET* em larga escala (Herman et al, 2018).

A evapotranspiração distribuída apresenta grande variabilidade espacial, que depende do tipo de cobertura do solo, região climática, entre outros fatores (Althoff et al., 2019). Atualmente, existem algoritmos bem sucedidos para realizar a estimativa da *ET* espacializada, mas a desvantagem está na complexidade de execução destes modelos (Allen et al., 2011). Allen et al. (2007) comentaram sobre as qualidades do modelo de Mapeamento da Evapotranspiração em Alta Resolução (METRIC), já possuindo modelo de calibração internalizada.

A *ET* também pode ser espacializada de forma mais simples, utilizando modelos alternativos como Camargo (1971), Thornthwaite (1948) e Moretti-Jerszurki-Silva (Jerszurki et al., 2017), espacializando somente as variáveis dos modelos (geralmente temperatura e/ou umidade relativa do ar), as quais podem ser obtidas por meio de associações entre dados remotos e medidos em estações meteorológicas, tal como realizado por Pelta e Chudnovsky (2017) e Liu et. al.

(2017). Entretanto, os satélites atuais não possuem na mesma plataforma resolução espacial moderada alta, como o Landsat, e resolução espacial diária, como o Terra/Aqua-MODIS (Wang et al, 2019; Bai et al, 2020). A alternativa para contornar o problema são os algoritmos (STARFM - Gao et al., 2006; ESTARFM - Zhu et al., 2010) que extraem o melhor dos dois satélites. Porém, a execução dos algoritmos é complexa, apesar de trazer bons resultados para as imagens estimadas temporalmente. A utilização da interpolação temporal das imagens Landsat com um algoritmo executável (*r.series.interp*), disponível no *software* Qgis, é uma alternativa mais simples. Porém, é necessário testar o algoritmo para avaliação da qualidade de estimativa.

Diante do contexto apresentado anteriormente, teve-se por objetivo no presente estudo: *i)* Propor, testar e avaliar um método simplificado para estimar a evapotranspiração de referência (*ET_o*) espacializada, baseando-se na associação de imagens de satélite e variáveis climáticas medidas em estações meteorológicas; e *ii)* Avaliar a variabilidade espacial da *ET_o* diária na Bacia Hidrográfica do Rio Tibagi (BHRT), estimada com dados remotos, considerando eventos ENOS (*El Niño*, *La Niña* e Normalidade climática), bem como estimar a *ET_o* na mesma bacia no intervalo entre imagens do satélite Landsat, utilizando algoritmo interpolador temporal.

A presente dissertação encontra-se subdividida em três capítulos, sendo:

- Capítulo I: Referencial teórico;
- Capítulo II: Associação espaço-temporal de variáveis climáticas e imagens de satélite para estimativa da evapotranspiração de referência na bacia hidrográfica do rio Tibagi, Estado do Paraná;
- Capítulo III: Variabilidade espaço-temporal da evapotranspiração de referência estimada com imagens de satélites na bacia hidrográfica do Rio Tibagi, Estado do Paraná.

1.1 CAPÍTULO I – REFERENCIAL TEÓRICO

1.1.1 Sensores orbitais passivos imageadores

O programa Landsat é um esforço conjunto do *United States Geological Survey* (USGS) e da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), do governo dos Estados Unidos da América (EUA). Desde 1972, com o satélite Landsat 1, o programa tem adquirido imagens da superfície terrestre, fornecendo valiosos dados para a pesquisa de uso/mudança da terra, sendo os dados aplicados à diversas áreas da pesquisa como silvicultura, agricultura, geologia, planejamento territorial (USGS, 2016). O acervo de dados do programa Landsat é um dos maiores e mais importantes conjuntos de imagens utilizados para pesquisa, devido às diversas aplicações dos produtos do satélite (Bertucini e Centeno, 2016).

Os dados Landsat utilizados no presente trabalho foram obtidos dos satélites Landsat 5, 7 e 8, disponíveis no repositório de dados “*Landsat Collection 2*”, com nível 1 de processamento da USGS (EarthExplorer, 2021). Essa coleção de imagens possui os avanços mais recentes em processamento de dados, característica que destaca a Coleção 2 na precisão absoluta de geolocalização de todo o conjunto de imagens disponível na coleção, sendo adequados para análises temporais. A precisão dos dados georreferenciados estão dentro da tolerância prescrita para o Nível 1 de processamento, com raiz quadrada do erro médio (*RMSE*) menor que 12 metros (Wulder et al., 2019; EROS, 2021).

A plataforma Landsat 5 possui a bordo o sensor *Thematic Mapper* (TM), projetado para capturar várias bandas do espectro eletromagnético, como as bandas da faixa do visível (entre 0,45 e 0,69 μm) e infravermelho próximo (entre 0,76 e 0,90 μm), com resolução espacial de 30 metros, além da faixa do infravermelho termal (entre 10,40 e 12,50 μm) com 120 metros de resolução espacial. O Landsat 7 possui o sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+), com faixas do visível e infravermelho próximo de 30 metros, faixa térmica de 60 metros e uma pancromática de 15 metros. Os comprimentos de ondas das bandas espectrais dos sensores TM e ETM+ são iguais. O Landsat 8 utiliza dois sensores: *Operational Land Image* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). O OLI captura as bandas do visível (entre 0,45 e 0,67 μm) e infravermelho próximo (entre 0,85 e 0,88 μm) com 30 metros de resolução. O TIRS disponibiliza duas bandas térmicas com resolução de 100 metros: bandas 10 (entre 10,60 e 11,19 μm) e 11 (entre 11,50 e 12,51 μm). A banda 10 tem

melhor relação sinal-ruído, gerando dados com melhor qualidade. (USGS, 2012; USGS, 2019).

Todos os satélites do programa Landsat têm resolução temporal de 16 dias, tempo em que o satélite leva para visitar a mesma localidade. O intervalo de tempo entre imagens é a principal limitação para algumas aplicações, como o monitoramento fenológico e eficiência hídrica de culturas para subsidiar manejo de irrigação, sendo necessárias informações mais frequentes (Cammalleri et al., 2013; Roy et al., 2014).

Quando os satélites Landsat foram lançados, as resoluções espaciais das bandas do infravermelho termal disponibilizavam somente imagens com 120 metros (Landsat 5 e 7) e 100 metros (Landsat 8). Atualmente, por meio da Coleção 2 Landsat da USGS, todas as imagens podem ser obtidas com resolução de 30 metros, mediante o avanço dos algoritmos de processamento de Nível 1. A melhoria nos dados permite realizar a comparação entre mapas de uso e cobertura (originados das bandas do visível e infravermelho próximo) e mapas de temperatura de superfície (estimados com bandas termais), devido à compatibilidade de resolução espacial. No entanto, uma limitação do sensoriamento remoto em geral (incluindo o programa Landsat) está na impossibilidade da faixa do infravermelho (próximo, médio e termal) não conseguir ultrapassar as nuvens, devido ao curto comprimento de onda, que é totalmente absorvido por elas. Assim, em condições de céu nublado, o sensor captura a nuvem sobre as imagens coloridas e temperatura de superfície, impossibilitando que as imagens registrem o que está abaixo da nuvem (a superfície terrestre), pois as duas são compostas pela faixa do infravermelho (USGS, 2012; Coelho e Correa, 2013).

Os satélites Terra e Aqua fazem parte do programa *Earth Observing System* (EOS) da NASA. O *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) é o principal instrumento a bordo das plataformas, sendo projetado para capturar 36 bandas espectrais, que variam entre 0,4 a 14,4 μm de comprimento de onda. Desta forma, são encontradas bandas com resoluções espaciais de 1000, 500 e 250 m.

A órbita do Terra é programada para passar de norte a sul, atravessando o equador pela manhã. A órbita do Aqua passa de sul a norte pelo equador, durante a tarde. Dessa forma, o MODIS a bordo do Terra e Aqua consegue imagear toda a superfície terrestre entre um e dois dias. Todos os produtos gerados pelo MODIS

são armazenados em arquivos do tipo “.hdf”, sendo um formato hierárquico para armazenamento de grande quantidade de dados científicos. No entanto, são necessários programas específicos para extrair as imagens de interesse no formato *geotiff* (formato que permite aplicação de geoprocessamento). No presente trabalho foi utilizado o Qgis, com um *script* (APÊNDICE 1) em linguagem Python (Borbas et al., 2017).

A iniciativa conjunta da Comissão Europeia (CE) e Agência Espacial Europeia (ESA) lançou a missão *Copernicus Sentinel-2*, que é composta por dois satélites de órbita polar. Os dois satélites foram colocados na mesma órbita sincronizada com o sol, mas em lados opostos, com diferença angular de 180°. Dessa forma, os satélites Sentinel-2A (lançado em 23/06/2015) e Sentinel-2B (lançado em 07/03/2017) alcançam alto tempo de revisita, sendo (ESA, 2020): dez dias no equador, com apenas um satélite; e, cinco dias com os dois satélites em condições sem nuvens, resultando em dois a três dias em latitudes médias. Os dois satélites possuem características idênticas, sendo equipados com *MultiSpectral Instrument* (MSI), composto por 13 bandas espectrais que variam do infravermelho próximo e visível para o infravermelho de ondas curtas. A resolução espacial varia de 10 a 60 m, dependendo da banda espectral (ESA, 2012a).

As imagens do Sentinel-2 são ótimas alternativas para o monitoramento em escala mais detalhada (espacial e temporalmente) da demanda de água em culturas agrícolas, utilizando modelos de evapotranspiração adequados como o *Environmental Policy Integrated Climate* (EPIC; Vanino et al, 2018) e *Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving* (SAFER; Teixeira et al, 2014; Leivas et al, 2019, Silva et al, 2019). No entanto, em algumas situações, a utilização das imagens Sentinel-2 para a estimativa da evapotranspiração ainda encontra algumas limitações. O Sentinel-2 não possui a banda espectral na faixa do infravermelho termal para estimativa da temperatura de superfície, o que impossibilita ou dificulta a realização de associações com a temperatura do ar medida em estação meteorológica. O satélite Sentinel-3 possui o instrumento *Sea and Land Surface Temperature Radiometer* (SLSTR) que permite obter a temperatura da superfície da terra. Porém, a sua resolução espacial (1 km) é muito baixa quando parada à resolução do Landsat (30 metros), dificultando a possibilidade de uso para as

finalidades do presente estudo. Na TABELA 1.1 encontram-se os principais satélites e produtos utilizados para realizar a estimativa da evapotranspiração espacializada.

TABELA 1.1 – PRINCIPAIS SATÉLITES E PRODUTOS UTILIZADOS PARA ESTIMAR A EVAPOTRANSPIRAÇÃO ESPACIALIZADA.

Satélite / Missão	Sensor / Produto	Banda Espectral	Intervalo Espectral (μm)	Resolução espacial (m)	Resolução Temporal (dias)	Fonte	
Landsat 5 e Landsat 7	TM	B1 Blue	0,441-0,514	30	16	USGS (2012); USGS (2016); USGS (2019)	
		B2 Green	0,519-0,601	30	16		
		B3 Red	0,631-0,692	30	16		
		B4 NIR	0,772-0,898	30	16		
	ETM+	B5 SWIR-1	1,547-1,749	30	16		
		B6 TIR	10,31-12,36	30	16		
		B7 SWIR-2	2,064-2,345	30	16		
		B8 PAN	0,515-0,896	15	16		
Landsat 8	OLI	B1 Costal/Aerosol	0,435-0,451	30	16	USGS (2012); USGS (2016); USGS (2019)	
		B2 Blue	0,452-0,512	30	16		
		B3 Green	0,533-0,590	30	16		
		B4 Red	0,636-0,673	30	16		
		B5 NIR	0,851-0,879	30	16		
		B6 SWIR-1	1,566-1,651	30	16		
		B7 SWIR-2	2,107-2,294	30	16		
		B9 Cirrus	1,363-1,384	30	16		
	B8 PAN	0,503-0,676	15	16			
	TIRS	B10 TIR-1	10,60-11,19	30	16	USGS (2012); USGS (2016); USGS (2019)	
		B11 TIR-2	11,50-12,51	30	16		
Sentinel-2A e Sentinel-2B	MSI	B2 Blue	0,555-0,425	10	5 e 10	ESA (2012a)	
		B3 Green	0,595-0,525	10	5 e 10		
		B4 Red	0,695-0,635	10	5 e 10		
		B8 NIR	0,957-0,727	10	5 e 10		
		B5 Red Edge 1	0,720-0,690	20	5 e 10		
		B6 Red Edge 2	0,755-0,725	20	5 e 10		
		B7 Red Edge 3	0,803-0,763	20	5 e 10		
		B8a Red Edge 4	0,885-0,845	20	5 e 10		
		B11 SWIR-1	1,700-1,520	20	5 e 10		
		B12 SWIR-1	2,370-2,010	20	5 e 10		
Sentinel-3 ⁽¹⁾	SLSTR	B1 Aerosol	0,463-0,423	60	5 e 10	ESA (2012b)	
		B9 Water Vapor	0,965-0,925	60	5 e 10		
		B10 Cirrus	1,405-1,345	60	5 e 10		
		S9 SST e LST	12,927-11,117	1000	1		
Terra e Aqua / MODIS ⁽¹⁾	MOD05	NIR - Total Precipitable Water	0,905-0,935	1000	1	Gao e Kaufman (1998)	
	MOD13Q1	B1 Red	0,600-0,700	250	16	Didan et al, 2015	
		B2 NIR	0,700-1,100	250	16		
	MOD16A2	<i>ET</i> real (kg/m ² /8day)			500	8	Running et al. (2019)
		<i>ET_o</i> (kg/m ² /8day)			500	8	

⁽¹⁾ Foram consideradas apenas os principais sensores e produtos para os satélites Sentinel-3, Terra e Aqua / MODIS.

1.1.2 Produtos estimados com sensoriamento remoto

Os produtos “água precipitável” do sensor MODIS consiste em estimar centímetro de coluna de vapor d’água. O algoritmo de recuperação do total de água precipitável baseia-se na quantidade de radiação solar refletida na faixa do infravermelho próximo (entre 0,865 e 1,24 μm) sobre o vapor de água, e o produto de água precipitável só é formado em áreas onde há uma superfície reflexiva no infravermelho próximo. Em condições de céu claro, a radiação incidente está sujeita à absorção do vapor de água atmosférico, espalhamento do aerossol atmosférico e reflexão da superfície. Assim, quando a radiação refletida é absorvida nos canais MODIS tem-se a informação de vapor de água próximo à superfície terrestre. Em condições de céu nublado, a radiação solar na faixa do infravermelho próximo não consegue ultrapassar as nuvens espessas e são refletidas para o sensor, levando a quantidade de vapor de água que não é da superfície terrestre, e sim da nuvem (Gao e Kaufman, 1998; Ji et. al., 2017).

A utilização de dados remotos (como imagens de satélites) para modelagem espacial da evapotranspiração (*ET*) é uma alternativa interessante para o monitoramento da variável em larga escala (Herman et al., 2018). Karimi et al. (2013) utilizaram imagens do produto MOD16 (sensor MODIS), que fornece dados diários de *ET* com resolução de 1 km, para contabilizar os recursos hídricos na bacia hidrográfica do Indu (1.160.000 km^2). Os autores constataram que a evapotranspiração e irrigação foram os responsáveis pelo esgotamento de recursos hídricos na bacia. Senay et al. (2019) estudaram a variação espaço-temporal da *ET* utilizando imagens Landsat (resolução 30 m) e *Operational Simplified Surface Energy Balance* (SSEBop), na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande (480.000 km^2), nos Estados Unidos e México. O estudo permitiu caracterizar historicamente a dinâmica do uso da água em campos agrícolas irrigados. Os estudos realizados demonstraram o potencial de uso do sensoriamento remoto em larga escala, para modelagem da *ET*. Além disso, os custos foram baixos, pois as imagens são gratuitas.

O monitoramento da evapotranspiração com métodos convencionais, realizando medidas com evapotranspirômetros e lisímetros (Bakhtiari et al., 2006) ou estimativas com metodologias consideradas padrão (Penman-Monteith; ASCE-EWRI, 2005) e empíricas (Alexandris e Kerkides, 2003; Moura et al., 2010), não são

viáveis para o monitoramento da ET em grandes extensões. Para obtenção de resultados satisfatórios seriam necessárias informações climáticas locais, em grande quantidade e qualidade, o que elevaria muito os custos e a logística. Desta forma, a estimativa da ET com sensoriamento remoto apresenta-se como alternativa mais adequada para monitoramentos em extensas bacias hidrográficas.

É muito comum na literatura o estudo da evapotranspiração de referência (ET_o) com modelos matemáticos. Allen et al. (1998) propuseram o modelo físico de Penman-Monteith como padrão, pois é capaz de calcular a ET_o com eficiência, tendo em vista que inclui todas as variáveis que governam o processo evapotranspirativo (Fan e Thomas, 2018). Estévez et al. (2009) estudando a sensibilidade do modelo de Penman-Monteith (ASCE-EWRI, 2005) no sul da Espanha, em clima semiárido típico do Mediterrâneo, verificaram que a umidade relativa (UR) e temperatura (T) do ar foram as variáveis que mais influenciaram na estimativa da ET_o . Jerszurki et al. (2017) também verificando a sensibilidade do modelo ET_o ASCE em diferentes tipos climáticos no Brasil, constataram que o déficit de pressão de vapor (DPV) foi a variável mais atuante na estimativa da ET_o . Como o DPV é função de UR e T , verifica-se que medições confiáveis de umidade relativa e temperatura são essenciais para estimativas precisas de ET_o .

1.1.3 Evapotranspiração de referência (ET_o)

A evapotranspiração real (ER) da superfície terrestre representa a transferência de grandes volumes de água para a atmosfera, por meio de processos de evaporação (superfície do solo e plantas) e transpiração das plantas (evaporação interna). A evapotranspiração de referência (ET_o) consiste na taxa de evaporação de água prontamente disponível em uma superfície uniforme de vegetação, com 100 m de extensão, contendo cultura hipotética de referência, como a grama com altura de 0,12 m ou alfafa com altura de 0,50 m. Assume-se que a cultura está em pleno crescimento vegetativo e sem restrição hídrica (ASCE-EWRI, 2005).

A literatura apresenta inúmeros métodos indiretos que podem ser utilizados para estimar a ET_o . A escolha do melhor método alternativo para determinada localidade deve ser realizada em avaliações ou testes com os mesmos, considerando também a disponibilidade e confiabilidade dos dados (Santos, 2020).

Oliveira (2018) realizou extensa fundamentação teórica, abordando aspectos sobre os principais métodos utilizados para realizar a estimativa da ET_o , e Santos (2020) também apresentou a formulação e variáveis de 32 dos principais modelos utilizados para realizar a sua estimativa.

O método de Penman-Monteith (PM-ASCE; Allen et al., 1998) é considerado padrão para estimativa da ET_o por se aproximar da evapotranspiração da grama nos locais em que foi testado, e apresentar superioridade em relação aos demais métodos, que são considerados alternativos (Alencar et al., 2015).

A qualidade de estimativa do PM-ASCE está associada ao fato do método ser baseado em processos físicos, combinando componentes aerodinâmicos e de balanço de energia. Entretanto, o PM-ASCE depende de entradas climáticas de qualidade (radiação solar, temperatura do ar, déficit de pressão de vapor, velocidade do vento) e, na falta destes dados, a utilização do método fica restrita. Assim, os métodos alternativos (que necessitam de menos variáveis) geralmente são utilizados para estimar a ET_o em locais com poucas variáveis e dados disponíveis (Allen et al., 2011; Souza et al., 2021).

Dentre as opções de métodos existentes (Santos, 2020), no presente estudo optou-se por estudar a ET_o baseando-se em modelos alternativos que usam como entrada a temperatura e/ou umidade relativa, por serem as variáveis de maior influência sobre ET_o . Neste sentido, pelos bons resultados e simplicidade se destacam os modelos de Thornthwaite (1948) para valor diário corrigido, Camargo (1971) e Moretti-Jerszurki-Silva (Jerszurki et al., 2017).

O método de Thornthwaite (1948) é simples e se baseia apenas na temperatura do ar (amplamente disponível) e duração máxima no comprimento do dia (com base latitude local), para estimar a ET_o . O método é recomendado para regiões contendo clima semelhante ao centro-leste dos Estados Unidos (Chen et al., 2005). Pereira et al. (2004) avaliando estimativas diárias da ET_o com método de Thornthwaite constataram desempenho similar ao modelo Penman-Monteith, mas com maior dispersão dos pontos. Portela et al. (2019) verificaram superestimativa do método em relação ao padrão, porém foram altamente correlacionados.

Baseado no método de Thornthwaite (1948), Camargo (1971) propôs um modelo mais simplificado, porém com desempenho semelhante. Os referidos

modelos estão entre os que tiveram menores erros comparados a *ET_o* Penman-Monteith (Melo et al., 2012). Utilizando evapotranspirômetros para medir a *ET_o* padrão, Camargo e Sentelhas (1997) relataram boas estimativas com os métodos Thornthwaite e Camargo. Apesar de se basearem apenas na temperatura, os modelos Camargo e Thornthwaite apresentam boas estimativas para o tipo climático *Cfa* no Brasil (Gurski et al., 2018).

O modelo Moretti-Jerszurki-Silva (MJS) baseia-se no potencial hídrico atmosférico e radiação solar no topo da atmosfera para estimar a *ET_o* (Jerszurki et al., 2017). Geralmente, modelos baseados apenas na temperatura do ar ou radiação solar mostram-se limitados para estimar a *ET_o* em diferentes tipos climáticos. Jerszurki et al. (2017), Oliveira (2018), Santos (2020) e Souza et al. (2021) obtiveram excelentes resultados com modelo MJS para diversas climas brasileiros, nas periodicidades diária e horária.

1.1.4 Espacialização da evapotranspiração de referência (*ET_o*)

Uma forma de espacializar a *ET_o* estimada com modelos alternativos consiste em realizar a distribuição espacial da temperatura e umidade relativa. A banda do infravermelho termal do satélite Landsat é amplamente utilizada para realizar estimativas de temperatura de superfície (Mutibwa et al., 2015; Luz et al., 2017), que associada a temperatura do ar medida em estações meteorológicas, possibilita a obtenção da temperatura do ar espacializada (Pelta e Chudnovsky, 2017). O produto MOD05 do sensor MODIS do satélite Aqua consegue recuperar o total de água precipitável (*W_p*). O dado remoto do MODIS é a variável espacializada que possui a melhor relação com a variável medida (*UR*) na estação meteorológica, que possibilite a espacialização da umidade relativa do ar (Liu et al., 2017). Para integração dos dados remotos e medidos é necessário um *software* de sistema de informação geográfica (SIG).

Dentre os programas existentes, o Qgis 3.10 é um pacote SIG comercial e gratuito interessante, pois apresenta interface de mapeamento intuitiva e conta com plug-ins opcionais (códigos de programa suplementares, escritos em linguagem Python, desenvolvidos por usuários do mundo todo) que ampliam as possibilidades de análise em geoprocessamento. Outros *softwares* de código aberto como *System*

for *Automated Geoscientific Analysis* (SAGA, 2021) e *Geographic Resources Analysis Support System* (GRASS, 2021), possuem bibliotecas que também podem ser acessadas da interface de usuário direta do Qgis. Usuários mais avançados (com conhecimento em linguagem de programação Python) podem construir *scripts* para análises de rotina, o que otimiza muito as análises em geoprocessamento. Entretanto, como nem todos os usuários possuem conhecimento em programação, o Qgis disponibiliza a interface “Modulo de Processamento”, que possibilita o fluxo de trabalho (com entradas, algoritmos e saídas) com todas as ferramentas disponíveis na plataforma, facilitando análises rotineiras. Pelos motivos descritos anteriormente, o Qgis foi o programa escolhido e utilizado no presente estudo para realizar as análises de geoprocessamento (Rogers e Staub, 2013; Meyer e Riechert, 2019).

Parâmetros hidrológicos obtidos com sensoriamento remoto, como evapotranspiração e umidade do solo podem fornecer um conjunto de informação que descrevem características naturais do sistema para calibração de modelos hidrológicos distribuídos como o SWAT e assim identificar características semelhantes entre diferentes bacias hidrográficas (Immerzeel e Droogers, 2008). A evapotranspiração espacializada é um componente importante na bacia hidrográfica para análises hidrológicas.

A bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água de precipitação, delimitada por divisores de água, que converge em redes de drenagem o escoamento da água para um único ponto de saída, denominado exutório (Paz, 2004). Hidrologicamente, a água de entrada na bacia (precipitação) é interceptada em sua superfície (vegetação, solo, rochas, lagos e rios). Uma vez na superfície, parte da água pode, predominantemente, infiltrar do solo (infiltração sub-superficial ou profundidade), escoar ou evapotranspirar. Além das interceptações naturais, existe também o uso da água pela população local da bacia. A dinâmica de todos esses fatores tornam a bacia hidrográfica uma importante e complexa unidade para a realização de estudos e modelagem ambiental (Busch, 2017).

A Bacia Hidrográfica do Rio Tibagi (BHRT), que tem a agropecuária como principal atividade econômica foi escolhida para aplicação e realização das análises do presente estudo (SEMA, 2013). Como estudos da evapotranspiração espacializada têm importância nesse setor econômico, acredita-se que a metodologia testada e análises realizadas poderão contribuir na fiscalização do

volume de água para irrigação expedido por outorgas (Sado et al., 2018), monitoramento e gestão de recurso hídricos (Choudhury e Bhattacharya, 2018), manejo de irrigação (Paula et al., 2019), estimativa de produtividade real com dados de biomassa e evapotranspiração (Bastiaanssen e Ali, 2003), entre outros. A BHRT abrange cidades importantes como Londrina e Ponta Grossa, que se destacam na agropecuária e indústria no Estado do Paraná (Ferreira, 2011; SEMA, 2013). Estudos da *ET_o* espacializada poderão disponibilizar informações relevantes para o planejamento, projeto e manejo agrícola da região.

1.1.5 Influência de eventos ENOS no regime hídrico

O estudo da *ET* em períodos de *El Niño* Oscilação Sul (ENOS) é importante, pois projeções indicam que fenômenos ENOS tendem a ocorrer com maiores intensidades (Cavalcante et al., 2015). Os fenômenos ENOS são divididos em duas fases: quente (*El Niño*) e fria (*La Niña*). As anomalias na temperatura da superfície do mar (TSM), nas águas do Oceano Pacífico tropical, associado às alterações da pressão atmosférica (representado pelo Índice de Oscilação Sul), proporcionam anomalias climáticas e alterações extremas nos regimes hídricos e térmicos em diferentes regiões do mundo (Cunha et al., 2011; Matzenauer et al., 2018).

Muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos relacionando eventos ENOS com as alterações no regime hídrico, sendo que o efeito de uma mesma fase é diferenciado entre locais (Fontana e Berlato, 1995; Abteu e Trimble, 2010; Hoell et al., 2017; Bomfim et al., 2021). Entretanto, poucos trabalhos avaliaram o efeito ENOS na evapotranspiração, em relação às variáveis (temperatura, umidade relativa, radiação e velocidade do vento) que comandam o processo evapotranspirativo. O estudo da relação entre eventos extremos e a *ET* é interessante, pois a evapotranspiração é um elemento importante em balanços hídricos, assim como a chuva, contribuindo para ações de monitoramento de recursos hídricos.

1.1.6 Fusão de dados de sensoriamento remoto

A cobertura por nuvens em imagens de satélite óptico passivo é um problema frequente, que acaba dificultando ou impedindo o uso das imagens para finalidades

como o mapeamento de áreas com cultivos agrícolas (Sugawara et al., 2008), ou para estimativa de temperatura da superfície (Coelho e Correa, 2013). As radiações eletromagnéticas (REM) da luz solar, nos comprimentos de ondas do visível e infravermelho, possuem, em média, valores menores que o tamanho médio das gotículas de vapor d'água que compõem as nuvens. Assim, a REM incidente na nuvem é refletida de volta para o espaço, e o sensor óptico registra apenas a nuvem, não quantificando a variável de interesse que se encontra na superfície terrestre (Meneses e Almeida, 2012). Um dos procedimentos para atenuar o efeito nuvem e névoa consiste em realizar a correção atmosférica. Porém, o procedimento altera os dados espectrais da imagem, como ocorre na estimativa da temperatura de superfície (Pires e Ferreira, 2015).

No tratamento de imagens de satélite óptico passivo é sempre recomendável preservar os dados originais, com menor alteração possível, para não degradar a informação contida na imagem original. Pires e Ferreira (2015) observaram que a temperatura de superfície terrestre estimada com imagem sem correção atmosférica apresentou valores mais próximos da temperatura do ar. Diante do exposto, é melhor obter imagens com menor percentual de cobertura de nuvens possíveis para fazer a estimativa temporal da evapotranspiração, reduzindo as fontes de erros. Logo, menor quantidade de nuvens em imagens de satélites favorece a estimativa mais precisa dos algoritmos de interpolação temporal (Liu et al., 2020).

Uma das limitações dos dados remotos está na relação da resolução espacial e temporal. Quando se tem resolução espacial moderada (1 km, como no sensor MODIS) é possível obter resolução temporal diária. No entanto, com resolução espacial moderadamente alta (30 m, como no satélite Landsat) a resolução temporal aumenta para 16 dias (Emelyanova et al., 2013; Bai et al., 2020). Para aproveitar melhor a resolução espacial do Landsat e temporal do MODIS, Gao et al. (2006) desenvolveu um algoritmo que permitiu a fusão da refletância adaptativa espacial e temporal (STARFM). A proposta e sistemática do algoritmo é interessante, mas a relação dos dados espaciais e temporais é dificultada por diversos fatores, sendo os dois principais: A observação do MODIS possui tipos mistos de cobertura terrestres quando comparado ao Landsat em escala de pixel; e Existem diferenças de refletância e de geolocalização. Para correção das diferenças entre os sensores é necessário aplicar diversas equações, para possibilitar imagens com resolução de

30 m (Landsat), em periodicidade diária (MODIS). O processo de fusão de imagens de satélites consiste em recuperar dados de alta resolução espacial e temporal (de diferentes sensores), para gerar imagens sintéticas com os melhores dados que os satélites disponibilizam (Zhang et al., 2015). Zhu et al. (2010) aprimorou o algoritmo já existente, criando o ESTARFM, melhorando a qualidade na estimativa temporal do modelo. No entanto, a complexidade do algoritmo também aumentou. O *software* Qgis possui um algoritmo de interpolação temporal de fácil manipulação e entendimento, denominado “*r.series.interp*”, do provedor Grass. A ferramenta é uma alternativa simplificada para melhorar a resolução temporal do Landsat.

Durante o processo de fusão são necessárias imagens possuindo boa resolução espacial (Landsat) e temporal (MODIS). Com o conjunto de imagens, por meio de diversos procedimentos, são geradas imagens sintéticas com alta resolução espacial e temporal. Comparada fusão de imagens, a interpolação de imagens com o algoritmo “*r.series.interp*” é obtida de forma mais simples e direta, pois é uma ferramenta que necessita apenas das imagens de alta resolução (Landsat) de entrada e configuração da ferramenta para o intervalo temporal desejado (diário, semanal ou mensal).

REFERÊNCIAS

ABTEW, W.; TRIMBLE, P. El Niño–Southern Oscillation Link to South Florida Hydrology and Water Management Applications. **Water Resources Management**, [S.L.], v. 24, n. 15, p. 4255-4271, 5 maio 2010. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-010-9656-2>.

ALENCAR, L. P.; SEDIYAMA, G. C.; MANTOVANI, E. C. Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o padrão FAO), para Minas Gerais, na ausência de alguns dados climáticos. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 35, n. 1, p. 39-50, fev. 2015. FapUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v35n1p39-50/2015>.

ALEXANDRIS, S.; KERKIDES, P. New empirical formula for hourly estimations of reference evapotranspiration. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 60, n. 3, p. 157-180, maio 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0378-3774\(02\)00172-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0378-3774(02)00172-5).

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: i. factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 98, n. 6, p. 899-920, abr. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.015>.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage**, Paper n. 56, Roma, FAO, 1998.

ALLEN, R. G.; PRUITT, W. O.; WRIGHT, J. L.; HOWELL, T. A.; VENTURA, F.; SNYDER, R.; ITENFISU, D.; STEDUTO, P.; BERENGENA, J.; YRISARRY, J. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 81, n. 1-2, p. 1-22, mar. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2005.03.007>.

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**, ASCE, v. 133, n. 4, p. 380-394, jul. 2007.

ALTHOFF, D.; ALVINO, F. C. G.; FILGUEIRAS, R.; ALEMAN, C. C.; CUNHA, F. F. Evapotranspiration for irrigated agriculture using orbital satellites. **Bioscience Journal**, [S.L.], p. 670-678, 2019. EDUFU - Editora da Universidade Federal de Uberlândia. <http://dx.doi.org/10.14393/bj-v35n3a2019-41737>.

ASCE-EWRI (New York). American Society of Civil Engineers. **The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation**. New York: American Society of Civil Engineers, 2005. 70 p. Task Committee Report.

BAI, B.; TAN, Y.; DONCHYTS, G.; HAAG, A.; WEERTS, A. A Simple Spatio-Temporal Data Fusion Method Based on Linear Regression Coefficient Compensation. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 12, n. 23, p. 3900, 28 nov. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12233900>.

BAKHTIARI, B.; MOGHADAS, R. K.; KHANJANI, M. J.; TARAZ, H. Kerman weighing electronic lysimeter error analysis. **Sustainable Irrigation Management, Technologies and Policies**, [S.L.], v. 96, n. 1, p. 137-147, 23 ago. 2006. WIT Press. <http://dx.doi.org/10.2495/si060141>.

BASTIAANSEN, W. G. M.; ALI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.L.], v. 94, n. 3, p. 321-340, mar. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0167-8809\(02\)00034-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0167-8809(02)00034-8).

BENLI, B.; KODAL, S.; ILBEYI, A.; USTUN, H. Determination of evapotranspiration and basal crop coefficient of alfalfa with a weighing lysimeter. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 81, n. 3, p. 358-370, mar. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2005.05.003>.

BERTUCINI JUNIOR, J. J.; CENTENO, J. A. S. Registro de série de imagens landsat usando correlação e análise de relação espacial. **Boletim de Ciências Geodésicas**, [S.L.], v. 22, n. 4, p. 685-702, dez. 2016. FapUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1982-21702016000400039>.

BOMFIM, F. F.; LANSAC-TÔHA, F. M.; BONECKER, C. C.; LANSAC-TÔHA, F. A. Determinants of zooplankton functional dissimilarity during years of El Niño and La Niña in floodplain shallow lakes. **Aquatic Sciences**, [S.L.], v. 83, n. 2, p. 1-13, 26

mar. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00027-021-00796-6>.

BORBAS, E.; MENZEL, P.; GAO, B. **MODIS Atmosphere L2 Water Vapor Product**. 2017. NASA MODIS Adaptive Processing System, Goddard Space Flight Center, [doi: 10.5067 / MODIS / MOD05_L2.061]. Disponível em: <https://atmosphere-imager.gsfc.nasa.gov/products/water-vapor/doi-reference>. Acesso em: 7 jun. 2021

BUSCH, B. F. **Análise da contribuição da interceptação vegetal e da evapotranspiração em um telhado verde composto por bromélias**. Projeto de Graduação (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

CAMARGO, A. P. **Balço hídrico no Estado de São Paulo**. 3.ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1971. 24p. (Boletim,116)

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 13 maio 1997. ISSN 0104-1347.

CAMMALLERI, C.; ANDERSON, M. C.; GAO, F.; HAIN, C. R.; KUSTAS, W. P. A data fusion approach for mapping daily evapotranspiration at field scale. **Water Resources Research**, [S.L.], v. 49, n. 8, p. 4672-4686, ago. 2013. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1002/wrcr.20349>.

CAVALCANTI, I. F. A.; CARRIL, A. F.; PENALBA, O. C.; GRIMM, A. M.; MENÉNDEZ, C. G.; SANCHEZ, E.; CHERCHI, A.; SÖRENSSON, A.; ROBLEDO, F.; RIVERA, J. Precipitation extremes over La Plata Basin – Review and new results from observations and climate simulations. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 523, p. 211-230, abr. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.028>.

CHEN, D.; GAO, G.; XU, C.; GUO, J.; REN, G. Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China. **Climate Research**, [S.L.], n. 28, p. 123-132, 16 mar. 2005.

CHIEW, F. H. S.; KAMALADASA, N. N.; MALANO, H. M.; MCMAHON, T. A. Penman-Monteith, FAO-24 reference crop evapotranspiration and class-A pan data in Australia. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 9-21, ago. 1995. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-3774\(95\)01172-f](http://dx.doi.org/10.1016/0378-3774(95)01172-f).

CHOUDHURY, I.; BHATTACHARYA, B. An assessment of satellite-based agricultural water productivity over the Indian region. **International Journal of Remote Sensing**, [S.L.], v. 39, n. 8, p. 2294-2311, 9 jan. 2018. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2017.1421792>.

COELHO, A. L. N.; CORREA, W. S. C. Temperatura de superfície celsius do sensor tirs/landsat-8: metodologia e aplicações: surface temperature sensor tirs/landsat-8: methodology and applications. **Revista Geográfica Brasileira**, Boa Vista, v. 7, n. 1, p. 31-45, jul. 2013.

CUNHA, G. R.; PIRES, J. L. F.; DALMAGO, G. A.; PASINATO, A.; SILVA, A. A. G.; ASSAD, E. D.; ROSA, C. M. El Niño/La Niña - Oscilação Sul e seus impactos na agricultura brasileira: fatos, especulações e aplicações. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 1, n. 121, p. 18-22, jan. 2011. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/914645>.

DIDAN, K.; MUNOZ, A. B.; SOLANO, R.; HUETE, A. **MODIS Vegetation Index User's Guide**. (MOD13 Series). 2015. Disponível em: https://vip.arizona.edu/documents/MODIS/MODIS_VI_UsersGuide_June_2015_C6.pdf. Acesso em: 09 set. 2021.

EARTHEXPLORER. United States Geological Survey (USGS). **Imagem Landsat**. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 25 maio 2021.

EMELYANOVA, I. V.; MCVICAR, T. R.; VAN NIEL, T. G.; LI, L. T.; VAN DIJK, A. I. J. M. Assessing the accuracy of blending Landsat–MODIS surface reflectances in two landscapes with contrasting spatial and temporal dynamics: a framework for algorithm selection. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 133, p. 193-209, jun. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.007>.

EROS, Earth Resources Observation and Science. **USGS EROS Archive - Landsat Archives - Landsat 8-9 Operational Land Imager and thermal Infrared Sensor Collection 2 Level-1 Data**. 2021. Collection 2 Landsat 8-9 OLI/TIRS Digital Object Identifier (DOI) number: /10.5066/P975CC9B. Disponível em: <https://doi.org/10.5066/P975CC9B>. Acesso em: 17 jun. 2021.

ESA, European Space Agency. **Sentinel-2**. 2020. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>. Acesso em: 07 set. 2021.

ESA, European Space Agency. **Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services**. Março 2012a. Disponível em: https://sentinel.esa.int/documents/247904/349490/S2_SP-1322_2.pdf. Acesso em: 07 set. 2021.

ESA, European Space Agency. **Sentinel-3: ESA's Global Land and Ocean Mission for GMES Operational Services**. Outubro 2012b. Disponível em: https://sentinel.esa.int/documents/247904/351187/S3_SP-1322_3.pdf. Acesso em: 07 set. 2021.

ESTÉVEZ, J.; GAVILÁN, P.; BERENGENA, J. Sensitivity analysis of a Penman-Monteith type equation to estimate reference evapotranspiration in southern Spain. **Hydrological Processes**, [S.L.], v. 23, n. 23, p. 3342-3353, 15 nov. 2009. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.7439>.

FAN, Z.; THOMAS, A. Decadal changes of reference crop evapotranspiration attribution: spatial and temporal variability over china 1960-2011. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 560, p. 461-470, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.080>.

FERREIRA, S. C. A centralidade de Londrina, Maringá, Cascavel, Ponta Grossa e Guarapuava na rede urbana do paraná. **Raega - O Espaço Geográfico em**

Análise, [S.L.], v. 23, p. 6-23, 3 nov. 2011. Universidade Federal do Parana. <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v23i0.24696>.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A. Relação entre el nino oscilação sul (enos), precipitação e rendimento de milho no estado do rio grande do sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 2, n. 1, p. 39-46, 25 set. 1995. Disponível em: <<http://revistapag.agricultura.rs.gov.br/ojs/index.php/revistapag/article/view/558>>. Acessado em: 20 jun. 2021.

GAO, B; KAUFMAN, Y. **The MODIS Near-IR Water Vapor Algorithm**: product id: mod05 - total precipitable water. [S.L.]: Nasa, 1998. 25 p. (Algorithm Technical Background Document). Disponível em: https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod03.pdf. Acesso em: 20 jun. 2021.

GAO, F.; MASEK, J.; SCHWALLER, M.; HALL, F. On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: predicting daily landsat surface reflectance. **Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, [S.L.], v. 44, n. 8, p. 2207-2218, ago. 2006. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tgrs.2006.872081>.

GRASS. **Geographic Resources Analysis Support System (GRASS)**. 2021. Disponível em: grass.osgeo.org. Acesso em: 15 jun. 2021.

GURSKI, B. C.; JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M. Alternative reference evapotranspiration methods for the main climate types of the state of Paraná, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 53, n. 9, p. 1003-1010, set. 2018. FapUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2018000900003>.

HERMAN, M. R.; NEJADHASHEMI, A. P.; ABOUALI, M.; HERNANDEZ-SUAREZ, J. S.; DANESHVAR, F.; ZHANG, Z.; ANDERSON, M. C.; SADEGHI, A. M.; HAIN, C. R.; SHARIFI, A. Evaluating the role of evapotranspiration remote sensing data in improving hydrological modeling predictability. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 556, p. 39-49, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.009>.

HOELL, A.; GAUGHAN, A. E.; SHUKLA, S.; MAGADZIRE, T. the Hydrologic Effects of Synchronous El Niño–Southern Oscillation and Subtropical Indian Ocean Dipole Events over Southern Africa. **Journal of Hydrometeorology**, [S.L.], v. 18, n. 9, p. 2407-2424, 1 set. 2017. American Meteorological Society. <http://dx.doi.org/10.1175/jhm-d-16-0294.1>.

IMMERZEEL, W.W.; DROOGERS, P. Calibration of a distributed hydrological model based on satellite evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 349, n. 1, p. 411-424, 2008. Doi:10.1016/j.jhydrol.2007.11.017.

JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M.; SILVA, L. C. R. Expanding the geography of evapotranspiration: An improved method to quantify land-to-air water fluxes in tropical and subtropical regions. **PLOS ONE**, v. 12, n. 6, p. 1-1, 2017. Disponível <<http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/publicacoes.htm>>. Acesso em: 1 set. 2019.

JI, D.; SHI, J.; XIONG, C.; WANG, T.; ZHANG, Y. A total precipitable water retrieval method over land using the combination of passive microwave and optical remote

sensing. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 191, p. 313-327, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.01.028>.

KARIMI, P.; BASTIAANSEN, W. G. M.; MOLDEN, D.; CHEEMA, M. J. M. Basin-wide water accounting based on remote sensing data: an application for the Indus basin. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S.L.], v. 17, n. 7, p. 2473-2486, 4 jul. 2013. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-17-2473-2013>.

LEIVAS, J. F.; TEIXEIRA, A. H. C.; MIRANDA, F.; TAKEMURA, C. M.; GARÇON, E. A. Imagens sentinel para obtenção de parâmetros agrometeorológicos espectrais, em área de cultivo de coqueiro anão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 18., 2019, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2019. 10 p.

LIU, M.; LIU, X.; DONG, X.; ZHAO, B.; ZOU, X.; WU, L.; WEI, H. An Improved Spatiotemporal Data Fusion Method Using Surface Heterogeneity Information Based on ESTARFM. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 12, n. 21, p. 3673, 9 nov. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12213673>.

LIU, S.; ZHA, Y.; ZHANG, J.; GAO, J.; ZHANG, Q. Detection of haze and its intensity based on visibility and relative humidity estimated from MODIS data. **International Journal of Remote Sensing**, [S.L.], v. 38, n. 23, p. 7085-7100, 31 ago. 2017. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2017.1371866>.

LÓPEZ-URREA, R.; OLALLA, F. M. S.; FÁBREGO, C.; MORATALLA, A. An evaluation of two hourly reference evapotranspiration equations for semiarid conditions. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 86, n. 3, p. 277-282, dez. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2006.05.017>.

LUZ, G. A.; GUASSELLI, L. A.; ROCHA, D. Temperature Surface of Guaíba Lake, RS, from time series of MODIS images. **RBRH**, [S.L.], v. 22, p. 2-14, 2017. FapUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011716094>.

MATZENAUER, R.; RADIN, B.; MALUF, J. R. T. O fenômeno ENOS e o regime de chuvas no Rio Grande do Sul. **Agrometeoros**, [S.L.], v. 25, n. 2, p. 323-331, 29 nov. 2018. AGROMETEOROS. <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v25i2.25510>.

MELO, G.; FERNANDES, A. L. T. Evaluation of empirical methods to estimate reference evapotranspiration in Uberaba, State of Minas Gerais, Brazil. **Revista da Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.32, n.5, p.875-888, 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v32n5/07.pdf>>.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Bahia: CNPq, 2012. 276 p.

MEYER, D.; RIECHERT, M. Open source QGIS toolkit for the Advanced Research WRF modelling system. **Environmental Modelling & Software**, [S.L.], v. 112, p. 166-178, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.10.018>.

MOURA, C. R. W.; ZOLNIER, S.; RIBEIRO, A.; OLIVEIRA, R. A. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração horária para alface cultivada em sistema hidropônico em ambiente protegido. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 30, n. 4,

p. 646-656, ago. 2010. FapUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-69162010000400009>.

MUTIIBWA, D.; STRACHAN, S.; ALBRIGHT, T. Land Surface Temperature and Surface Air Temperature in Complex Terrain. **Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, [s. l.], v. 8, n. 10, p. 4762-4774, out. 2015.

OLIVEIRA, S. R. **Ajuste do método Moretti-Jerszurki-Silva para estimar a evapotranspiração de referência diária e horária dos tipos climáticos brasileiros**. Curitiba, 2018. 537p. Tese (Doutorado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

PAULA, A. C. P.; SILVA, C. L.; RODRIGUES, L. N.; SCHERER-WARREN, M. Performance of the SSEBop model in the estimation of the actual evapotranspiration of soybean and bean crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 54, p. 1-11, 2019. FapUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-3921.pab2019.v54.00739>.

PAZ, A. R. **Hidrologia Aplicada**. Disciplina Ministrada (curso de graduação em Engenharia de Bioprocessos) – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Caxias do Sul, 2004.

PELTA, R.; CHUDNOVSKY, A. A. Spatiotemporal estimation of air temperature patterns at the street level using high resolution satellite imagery. **Science of the Total Environment**, [S.L.], v. 579, p. 675-684, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.042>.

PEREIRA, A. R.; PRUITT, W. O. Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 66, n. 3, p. 251-257, maio 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2003.11.003>.

PIRES, E. G.; FERREIRA JUNIOR, L. G. Mapeamento da temperatura de superfície a partir de imagens ter. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, Não use números Romanos ou letras, use somente números Árabicos. 2015, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: Inpe, 2015. p. 7421-7428.

PORTELA, M. M.; SANTOS, J.; STUDART, T. M. C. Effect of the Evapotranspiration of Thornthwaite and of Penman- Monteith in the Estimation of Monthly Streamflows Based on a Monthly Water Balance Model. **Intechopen**, [S.l.], v. 3, n. 1, p. 1-14, 17 set. 2019. DOI: 10.5772/intechopen.88441.

ROGERS, S. R; STAUB, B. Standard use of Geographic Information System (GIS) techniques in honey bee research. **Journal of Apicultural Research**, [S.L.], v. 52, n. 4, p. 1-48, jan. 2013. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.3896/ibra.1.52.4.08>.

ROY, D. P.; WULDER, M. A.; LOVELAND, T. R.; WOODCOCK, C. E.; ALLEN, R. G.; ANDERSON, M. C.; HELDER, D.; IRONS, J. R.; JOHNSON, D. M.; KENNEDY, R. Landsat-8: science and product vision for terrestrial global change research. **Remote**

Sensing of Environment, [S.L.], v. 145, p. 154-172, abr. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>.

RUNNING, S. W.; MU, Q.; ZHAO, M.; MORENO, A. **User's Guide MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product**: nasa earth observing system modis land algorithm (for collection 6). NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (For Collection 6). 2019. Disponível em: <https://modis-land.gsfc.nasa.gov/pdf/MOD16UsersGuideV2.022019.pdf>. Acesso em: 09 set. 2021.

SADO, R.; WARREN, M.; ROIG, H. Estimativa de irrigação por meio de sensoriamento remoto na bacia hidrográfica do Alto São Marcos. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S.L.], v. 70, n. 3, p. 787-802, 30 set. 2018. EDUFU - Editora da Universidade Federal de Uberlândia. <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv70n3-45700>.

SAGA. **System for Automated Geoscientific Analysis (SAGA)**. 2021. Disponível em: <http://www.saga-gis.org/>. Acesso em: 19 jun. 2021.

SANTOS, A. A. **Evapotranspiração de referência horária e diária para o Estado do Paraná**. Curitiba, 2020. 214p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

SEMA (Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos). **Bacias Hidrográficas do Paraná**: série histórica. Curitiba: Sema - Pr, 2013. 140 p. (2ª Edição).

SENAY, G. B.; SCHAUER, M.; VELPURI, N. M.; SINGH, R. K.; KAGONE, S.; FRIEDRICHS, M.; LITVAK, M. E.; DOUGLAS-MANKIN, K. R. Long-Term (1986–2015) Crop Water Use Characterization over the Upper Rio Grande Basin of United States and Mexico Using Landsat-Based Evapotranspiration. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 11, n. 13, p. 1587, 4 jul. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs11131587>.

SILVA, C. O. F.; TEIXEIRA, A. H. C.; MANZIONE, R. L. Agriwater: An R package for spatial modelling of energy balance and actual evapotranspiration using satellite images and agrometeorological data. **Environmental Modelling & Software**, [S.L.], v. 120, n. 1, p. 1-19, 30 jul. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104497>.

SOUZA, J. L. M.; OLIVEIRA, S. R.; ROSA, S. L. K.; JERSZURKI, D. Hourly reference evapotranspiration by Moretti-Jerszurki-Silva method using data from alternative station. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 25, n. 8, p. 505-513, ago. 2021. FapUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n8p505-513>.

SUGAWARA, L. M.; RUDORFF, B. F. T.; ADAMI, M. Viabilidade de uso de imagens do Landsat em mapeamento de área cultivada com soja no Estado do Paraná. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 43, n. 12, p. 1777-1783, dez. 2008. FapUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2008001200019>.

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F.; BOLFE, E. L. Energy balance with Landsat images in irrigated central pivots with

corn crop in the São Paulo State, Brazil. **Proceedings of Spie**, Amsterdam, v. 9239, n. 1, p. 1-11, 29 out. 2014. Doi: 10.1117/12.2067090.

THORNTHWAITE, C. W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. **Geographical Review**, [S.L.], v. 38, n. 1, p. 55-94, jan. 1948. [Http://www.jstor.org/stable/210739](http://www.jstor.org/stable/210739).

TYAGI, N. K; SHARMA, D. K; LUTHRA, S. K. Determination of evapotranspiration and crop coefficients of rice and sunflower with lysimeter. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 45, n. 1, p. 41-54, jun. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0378-3774\(99\)00071-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0378-3774(99)00071-2).

USGS (South Dakota). National Aeronautics and Space Administration (nasa). **Landsat 8 (L8) Data Users Handbook**. 4. ed. Sioux Falls: U.s. Geological Survey (usgs), 2019. 115 p. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-8-data-users-handbook>>. Acesso em: 02 set. 2019.

USGS. Landsat – Earth observation satellites. **Fact Sheet**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 1-4, jun. 2016. US Geological Survey. <http://dx.doi.org/10.3133/fs20153081>. Disponível em: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/fs20153081>. Acesso em: 15 jun. 2021.

USGS. Landsat: a global land-imaging mission. **Fact Sheet**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 1-1, 2012. US Geological Survey. <http://dx.doi.org/10.3133/fs20123072>. Disponível em: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/fs20123072>. Acesso em: 16 jun. 2021.

VANINO, S.; NINO, P.; MICHELE, C.; BOLOGNESI, S. F.; D'URSO, G.; BENE, C.; PENNELLI, B.; VUOLO, F.; FARINA, R.; PULIGHE, G. Capability of Sentinel-2 data for estimating maximum evapotranspiration and irrigation requirements for tomato crop in Central Italy. **Remote Sensing of Environment**, [s. l], p. 452-470, 24 jun. 2018. [Https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.06.035](https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.06.035).

WANG, T.; TANG, R.; LI, Z.; JIANG, Y.; LIU, M.; NIU, L. An Improved Spatio-Temporal Adaptive Data Fusion Algorithm for Evapotranspiration Mapping. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 11, n. 7, p. 761, 29 mar. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs11070761>.

WULDER, M. A.; LOVELAND, T. R.; ROY, D. P.; CRAWFORD, C. J.; MASEK, J. G.; WOODCOCK, C. E.; ALLEN, R. G.; ANDERSON, M. C.; BELWARD, A. S.; COHEN, W. B. Current status of Landsat program, science, and applications. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 225, p. 127-147, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.015>.

ZHANG, H. K.; HUANG, B.; ZHANG, M.; CAO, K.; YU, L. A generalization of spatial and temporal fusion methods for remotely sensed surface parameters. **International Journal of Remote Sensing**, [S.L.], v. 36, n. 17, p. 4411-4445, 2 set. 2015. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2015.1083633>.

ZHU, X.; CHEN, J.; GAO, F.; CHEN, X.; MASEK, J. G. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 114, n. 11, p. 2610-2623, nov. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2010.05.032>.

2 CAPÍTULO II – ASSOCIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E IMAGENS DE SATÉLITE PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TIBAGI, ESTADO DO PARANÁ.

2.1 RESUMO

Teve-se por objetivo no presente estudo propor, testar e avaliar uma metodologia para estimar a evapotranspiração de referência (ET_o) espacializada, baseando-se na associação de imagens de satélite e variáveis medidas em estações meteorológicas. Imagens do satélite Landsat 8 e Aqua MODIS que cobrem a Bacia Hidrográfica do Rio Tibagi (BHRT) foram utilizadas para estimar as variáveis: temperatura da superfície (T_s) e coluna total de vapor d'água precipitável (W_p), respectivamente. Utilizando-se de regressão linear simples e múltipla, valores de T_s e W_p foram associados aos valores de temperatura média do ar (Tm_{EM}) e umidade relativa média do ar (URm_{EM}), respectivamente, medidos em estações meteorológicas. A calibração das equações de ajuste linear (simples e múltipla) das variáveis temperatura (Te_{SR}) e umidade relativa (URe_{SR}) média do ar foi realizada com dados diferentes da validação. Estimativas da ET_o com modelos alternativos utilizando dados meteorológicos espacializados (Te_{SR} e URe_{SR}) foram comparados com a ET_o estimada com o modelo Penman Monteith ASCE. A qualidade das estimativas na validação foi avaliada com índices estatísticos ($RMSE$, NSE , $ERPAM\%$, d , r). Os dados meteorológicos utilizados para caracterizar a BHRT foram considerados normais para o clima da bacia. O modelo linear múltiplo com apenas uma regressão geral considerando toda BHRT apresentou desempenho satisfatório para estimar $Te_{SR(W_p;T_s)}$ ($r = 0,87$) e $URe_{SR(W_p;T_s)}$ ($r = 0,41$) na etapa da validação. A $ET_{oMJS(Ra; \psi_{ar})}$ ($r = 0,67$) e ET_{oC} ($r = 0,63$) estimadas com os modelos Moretti-Jerszurki-Silva e Camargo, respectivamente, foram os modelos que alcançaram melhor desempenho na estimativa da ET_o com dados remotos.

Palavras-chave: Modelagem, temperatura, umidade relativa, relações hídricas, dados remotos.

2.2 ABSTRACT

The goal of this study was to propose, test and evaluate a methodology to estimate the spatialized reference evapotranspiration (ET_o), based on the association of satellite images and variables measured in meteorological stations. Landsat 8 and Aqua MODIS satellite images covering the Tibagi River Basin (TRB) were used to estimate the variables: surface temperature (T_s) and total column of precipitable water vapor (W_p), respectively. Using simple and multiple linear regression, T_s and W_p values were associated with mean air temperature ($T_{m_{EM}}$) and mean relative air humidity ($UR_{m_{EM}}$), respectively, measured in meteorological stations. The calibration of the linear adjustment equations (single and multiple) of the variables of temperature (Te_{SR}) and mean relative humidity ($UR_{e_{SR}}$) of the air was performed with data other than the validation. ET_o estimates with alternative models using spatialized meteorological data (Te_{SR} and $UR_{e_{SR}}$) were compared with ET_o estimated with the Penman-Monteith ASCE model. The quality of the estimates in the validation was evaluated with statistical indices ($RMSE$, NSE , $ERPAM_{\%}$, d , r). The climatic data used to characterize the TRB were considered normal for the basin climate. The multiple linear model with only one general regression considering the entire TRB presented satisfactory performance to estimate $Te_{SR(W_p;T_s)}$ ($r = 0.87$) and $UR_{e_{SR}(W_p;T_s)}$ ($r = 0.41$) in the validation stage. The $ET_{O_{MJS(Ra; \psi_{ar})}}$ ($r = 0.67$) and ET_{O_C} ($r = 0.63$) estimated with the Moretti-Jerszurki-Silva and Camargo models, respectively, were the models that achieved the best performance in estimating the ET_o with remote data.

Keywords: Modeling, temperature, relative humidity, water relations, remote data.

2.3 INTRODUÇÃO

A demanda hídrica de culturas anuais tem forte relação com a produtividade da lavoura, bem como o conhecimento do consumo de água é importante para o gerenciamento agrícola sustentável, possibilitando sua otimização (Filgueiras et al, 2019a). Luenenberg et al. (2009) consideraram a possibilidade de economizar 58,6% da água de irrigação adotando-se manejo adequado para cultura do feijão cultivado em pivô central. Desta forma, como a irrigação representa 54% da água consumida no Brasil (FGV, 2016), acredita-se que o conhecimento da evapotranspiração (*ET*) é importante para o uso racional da água, para aumento da produtividade e sustentabilidade dos recursos hídricos (Choudhury e Bhattacharya, 2018).

Além de contribuir para sustentabilidade dos recursos hídricos, a evapotranspiração também possibilita estimar a produtividade da lavoura, mediante a análise da eficiência da conversão de água em alimentos em sistemas agrícolas (Shabbir et al., 2012; Choudhury e Bhattacharya, 2018). Bastiaanssen e Ali (2003) propuseram um modelo utilizando dados de biomassa e evapotranspiração, obtido com sensor remoto, para estimar a produtividade real da lavoura. A estimativa espacial da evapotranspiração só vem a contribuir para o gerenciamento racional dos recursos hídricos (Karimi et al., 2013; Ma et al., 2019; Senay et al., 2019), bem como para informações localizadas de produção de lavouras (Anderson et al., 2016; Filgueiras et al., 2019a), direcionando o produtor para corrigir áreas específicas no talhão.

Para a espacialização da *ET* é necessário ter dados de entrada obtidos por sensoriamento remoto, e a temperatura de superfície é a variável de entrada mais utilizada (Anderson et al., 2012, Nouri et al., 2017, Wang et al., 2021), por ser importante fator no balanço de energia para a sua estimativa (Filgueiras et al., 2019b). Pelta e Chudnovsky (2017) consideram que a temperatura de superfície tem estreita relação linear com a temperatura do ar, permitindo a realização de boas estimativas. Liu et al. (2017) apontaram o vapor de água atmosférico precipitável (W_p) do sensor MODIS como o dado que tem melhor associação para estimar a umidade relativa do ar.

A *ET* é uma variável difícil de medir ou estimar matematicamente, porque depende da interação mutua e não linear de vários fatores climáticos, principalmente

temperatura, umidade, velocidade do vento e radiação (Jing et al., 2019). O modelo físico padrão Penman-Monteith (Allen et al., 1998) é capaz de calcular a ET_o com eficiência, já que inclui todas as variáveis que governam o processo evapotranspirativo (Fan e Thomas, 2018). Porém, o modelo Penman-Monteith só pode ser usado quando se tem todas as variáveis disponíveis, restringindo o uso em regiões com poucas informações meteorológicas. Alternativo ao modelo padrão, existem modelos de ET_o espacializados, que consideram a importância da variabilidade espacial da evapotranspiração (Althoff et al., 2019; Paca et al., 2019).

Na literatura, verificou-se que os modelos remotos desenvolvidos baseando-se no balanço de energia de superfície (METRIC – Modelo de Mapeamento da Evapotranspiração em Alta Resolução, com Modelo de Calibração Internalizada; SEBAL – Modelo com Algoritmo de Balanço de Energia para Terra; e, SSEBop – Modelo de Balanço de Energia de Superfície Simplificado Operacional) permitiram testar e escolher a opção que melhor se adapta à determinada região (Singh e Senay, 2015; Wagle et al., 2017). No entanto, os modelos desenvolvidos até o momento são muitos complexos, pois o mecanismo de funcionamento interno exige dos usuários conhecimento do balanço energético, física da radiação, vegetação e práticas agrícolas para proceder qualquer tipo de alteração (Allen et al., 2011). Atualmente, o METRIC e SSEBop possuem plataformas *online* e sistema de informação geográfica (SIG) que permitem a estimativa da evapotranspiração espacializada (Allen et al., 2007; Senay et al., 2016, ANA, 2020, Ramírez-Cuesta et al., 2020; Venancio et al., 2020), o que facilita o uso do modelo.

O que torna complexo os modelos para estimar a ET são os inúmeros cálculos das variáveis biofísicas, até se chegar ao produto final. Uma forma simplificada para estimar a ET espacializada consistiria em realizar a associação entre variáveis disponíveis em imagens de satélite e variáveis climáticas medidas em estações meteorológicas. O resultado poderia ser satisfatório, desde que houvesse estreita associação entre a temperatura de superfície e temperatura do ar, ou umidade relativa e vapor d'água.

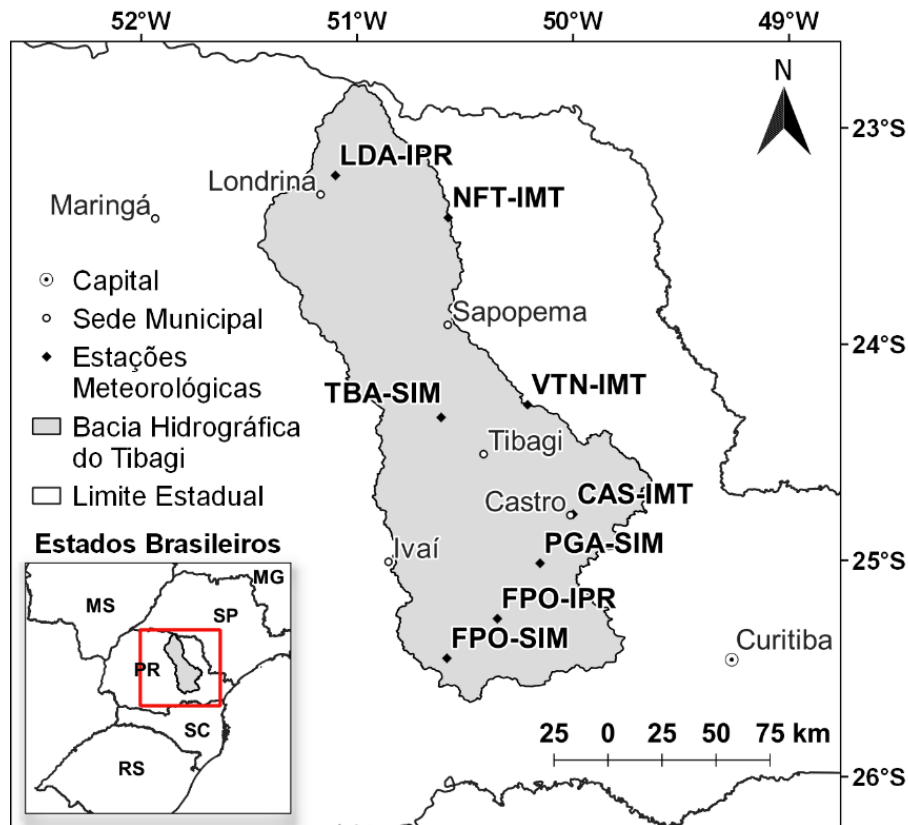
Diante do contexto apresentado anteriormente, teve-se por objetivo no presente estudo propor, testar e avaliar uma metodologia simplificada para estimar a evapotranspiração de referência (ET_o) espacializada, baseando-se na associação de imagens de satélite e variáveis climáticas medidas em estações meteorológicas.

2.4 MATERIAL E MÉTODOS

2.4.1 Descrição da área de estudo

A área de estudo consistiu na Bacia Hidrográfica do Rio Tibagi (BHRT), localizada na porção centro leste do Estado do Paraná (FIGURA 2.1), compreendendo superfície de 25000 km², aproximadamente 13% da extensão territorial do Estado. A BHRT possui dois tipos climáticos: *Cfa* – com temperaturas máximas acima de 22 °C; e, *Cfb* – com temperaturas máximas abaixo de 22 °C, sendo no mínimo quatro meses com temperaturas menores que 10 °C. Nos climas *Cfa* e *Cfb* a precipitação anual varia entre 1600 e 1900 mm (Alvares et al., 2013).

FIGURA 2.1 – LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIBAGI (BHRT), CONTENDO A DISTRIBUIÇÃO DE SUAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS.



FONTE: O Autor (2020)

A BHRT foi escolhida por apresentar características físico-climáticas distintas, em relação à posição geográfica. A distinção físico-climática foi desejável para avaliar a aplicabilidade e qualidade dos modelos a serem testados nas etapas de calibração e validação.

2.4.2 Registros Meteorológicos

Os dados meteorológicos para a realização das análises foram obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná (SIMEPAR) e Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR). Os dados meteorológicos do IAPAR e SIMEPAR foram disponibilizados na periodicidade diária, e os do INMET na periodicidade horária, sendo convertidos posteriormente fazendo-se a média das leituras em 24 h para cada variável. Para os horários contendo falhas de medições, calculou-se a média dos horários disponíveis no banco de dados.

Para o estudo das estimativas das variáveis climáticas especializadas ($T_{e_{SR}}$ – temperatura do ar; $UR_{e_{SR}}$ – umidade relativa do ar; ET_o – evapotranspiração de referência), foram consideradas oito estações meteorológicas (TABELA 2.1). Os dados das estações meteorológicas foram obtidos no período entre 2014 e 2018.

Todas as estações meteorológicas e sensores utilizados no INMET são da marca Vaisala. As estações meteorológicas modelo MAWS301, utilizam os termômetros modelo QMT102 para medição da temperatura do ar, e o Higrógrafo modelo QMH101 mede a umidade relativa do ar. O SIMEPAR utiliza estações das marcas Sutron e Campbell, contendo sensores de temperatura e umidade relativa do ar, da marca Vaisala, modelo HMP155. O IAPAR possui estações da marca R. Fuess, e os sensores modelo TH48 UG03 medem a temperatura do ar e o modelo BG49 UG19 mede a umidade relativa do ar.

TABELA 2.1 – IDENTIFICAÇÃO, LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TIGABI, UTILIZADAS NO PRESENTE ESTUDO.

Identificação	Estação	Instituto	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Clima
FPO-IPR	Fernandes Pinheiro	IAPAR	25°16'12,00" S	50°21'00,00" W	893	<i>Cfb</i>
LDA-IPR	Londrina	IAPAR	23°13'12,00" S	51°06'00,00" W	585	<i>Cfa</i>
CAS-IMT	Castro	INMET	24°16'49,42" S	50°12'36,54" W	1008	<i>Cfb</i>
NFT-IMT	Nova Fátima	INMET	23°24'55,02" S	50°34'39,88" W	668	<i>Cfa</i>
VTN-IMT	Ventania	INMET	24°47'13,03" S	49°59'57,36" W	1106	<i>Cfb</i>
FPO-SIM	Fernandes Pinheiro	SIMEPAR	25°27'11,52" S	50°35'02,04" W	894	<i>Cfb</i>
PGA-SIM	Ponta Grossa	SIMEPAR	25°00'49,32"S	50°09'08,64"W	885	<i>Cfb</i>
TBA-SIM	Telêmaco Borba	SIMEPAR	24°20'20,40"S	50°36'38,16"W	754	<i>Cfa</i>

FONTE: O Autor (2020)

2.4.3 Imagens de satélite

As imagens do satélite Landsat 8 foram obtidas do repositório de dados geográficos *EarthExplorer* (EarthExplorer, 2020), da *United States Geological Survey* (USGS). As imagens Aqua MODIS foram obtidas no repositório do *Goddard Space Flight Center* (Gao et al., 2015). As instituições fazem parte da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), do Governo Federal dos Estados Unidos.

Para cobrir as oito estações estudadas na área da BHRT foram necessárias três cenas do satélite Landsat 8 TIRS (órbita/pontos: 222076; 221078; 221077), e uma cena do satélite Aqua (órbita/ponto h13v11).

Na seleção das imagens de satélite (Landsat e Aqua) considerou-se a data e horário de obtenção das mesmas, sendo o mais próximo possível do dia e horário de medição da temperatura do ar nas estações meteorológicas ($T_{m_{EM}}$). As cenas Landsat 8 foram obtidas em torno das 13 h 20 min., e a Aqua MODIS, produto MYD05_L2, em torno das 17 h 10 min. Para a escolha das imagens de satélite e períodos de estudo foram estabelecidos e seguidos alguns critérios:

a) Critérios para escolha das imagens de satélite

- Escolheu-se imagens sem presença de nuvens sobre a estação meteorológica, pois as nuvens modificam a temperatura da superfície na imagem de satélite;
- Priorizou-se condições de céu claro (menor cobertura de nuvens possível) das imagens de satélite Landsat em detrimento das imagens do satélite Aqua MODIS, pois a resolução espacial do Landsat tem melhor qualidade, possibilitando a utilização do dado em escala ampla (maior detalhamento);
- Coletou-se três imagens por ano, sendo uma imagem por quadrimestre ao longo do ano, para que ao menos três estações do ano fossem representadas por valores das variáveis meteorológicas.

b) Critério para a escolha do período de estudo:

- Para seleção do período de análise, considerou-se a existência de leituras de um mesmo satélite para cada variável. Desta forma, escolheu-se o período entre 2014 e 2018, que permitiu a utilização de apenas um tipo de satélite (Landsat 8) para coleta dos dados de temperatura da superfície. Para um período maior, seria necessário a inclusão de dados de outro satélite (Landsat 5), o que poderia ser fonte de erros na

calibração e validação dos modelos, com dados de sensor diferentes (dados enviesados).

Cada cena do satélite Landsat 8 cobre área de 190 km (altura) por 180 km (largura). A imagem do satélite Aqua, sensor MODIS, cobre área de 2040 km (altura) por 2880 km (largura). Portanto, a imagem Aqua é 170 vezes maior que a do Landsat. Como a BHRT tem 25000 km², foram necessárias quatro cenas Landsat para cobrir toda a bacia, e apenas uma imagem Aqua. Ao todo, foram coletadas 45 imagens Landsat e 34 imagens Aqua para realizar as análises. Devido à diferença de cobertura de área, o número de imagens obtido em cada plataforma foi diferente. As imagens dos dois satélites foram obtidas no período entre 2014 e 2018.

2.4.4 Calibração e validação da temperatura e umidade relativa do ar estimada com sensoriamento remoto

a) Calibração

As variáveis meteorológicas especializadas estimadas (Te_{SR} e UR_{eSR}) foram obtidas com modelos de regressão linear (simples e múltipla). Os dados meteorológicos e de sensoriamento remoto foram obtidos entre 2014 e 2015 para calibração dos modelos (APÊNDICE 2). Desta forma, o processo de calibração para a determinação dos coeficientes dos modelos (a_0 , a_1 e a_2) consistiram nas associações:

i) Temperatura do ar estimada com sensoriamento remoto, por meio de imagem de satélite (Te_{SR}), obtidas das associações: " Ts vs. Tm_{EM} " (Equação 1) e " Wp vs. Ts vs. Tm_{EM} " (Equação 2):

$$Te_{SR(Ts)} = a_1 \cdot Ts + a_0 \quad (1)$$

$$Te_{SR(Wp; Ts)} = a_2 \cdot Wp + a_1 \cdot Ts + a_0 \quad (2)$$

ii) Umidade relativa do ar estimada com sensoriamento remoto, por meio de imagem de satélite (UR_{eSR}), em associações: " Wp vs. URm_{EM} " (Equação 3) e " Wp vs. Ts vs. URm_{EM} " (Equação 4):

$$UR_{eSR(Wp)} = a_1 \cdot Wp + a_0 \quad (3)$$

$$UR_{eSR(Wp; Ts)} = a_2 \cdot Wp + a_1 \cdot Ts + a_0 \quad (4)$$

Sendo: $T_{e_{SR}(T_s)}$ – temperatura do ar estimada com sensoriamento remoto por ajuste linear (°C); T_s – temperatura da superfície do solo estimada da banda 10 do satélite Landsat (°C); $T_{e_{SR}(W_p; T_s)}$ – temperatura do ar estimada com sensoriamento remoto por ajuste linear múltiplo (°C); W_p – coluna total de vapor d’água precipitável estimada com satélite Aqua MODIS produto MYD05_L2 (cm); $UR_{e_{SR}(W_p)}$ – umidade relativa do ar estimada com sensoriamento remoto por ajuste linear (%); $UR_{e_{SR}(W_p; T_s)}$ – umidade relativa do ar estimada com sensoriamento remoto com ajuste linear múltiplo (%); a_0 , a_1 e a_2 – coeficientes da equação obtida no ajuste linear simples ou múltiplo.

No ajuste dos coeficientes a_0 e a_1 das equações de regressão dos modelos lineares simples foi utilizada a função de análise de regressão de uma planilha eletrônica. Os coeficientes a_0 , a_1 e a_2 das equações de regressão do modelo linear múltiplo foram calculados com a ferramenta “Regressão do conjunto análise de dados” de uma planilha eletrônica, sendo necessário os procedimentos:

- i) Indicar no campo “Intervalo Y de entrada” os valores da variável dependente (Tm_{EM} ou URm_{EM});
- ii) Indicar no campo “Intervalo X de entrada” os valores das variáveis independentes (W_p e T_s);

As análises de regressão para os modelos lineares simples e múltiplo foram realizadas seguindo dois procedimentos. Em um procedimento, ajustou-se uma equação para cada estação de forma individual, em que cada estação teve seis observações nos anos de 2014 e 2015, totalizando oito equações de regressão. Em outro procedimento, todas as estações foram analisadas em conjunto, considerando o total de 48 observações, resultando em uma única equação denominada de Regressão Geral (RG).

As associações realizadas na calibração foram avaliadas conforme os coeficientes estatísticos apresentados no Item 2.4.8.

b) Validação

Consistiu na associação entre os respectivos valores: “ Tm_{EM} vs $T_{e_{SR}(T_s)}$ (Equação 1)”; “ Tm_{EM} vs $T_{e_{SR}(W_p; T_s)}$ (Equação 2)”; “ URm_{EM} vs $UR_{e_{SR}(W_p)}$ (Equação 3)” e “ URm_{EM} vs $UR_{e_{SR}(W_p; T_s)}$ (Equação 4)”. As análises foram realizadas com dados

meteorológicos e de sensoriamento remoto coletados entre 2016 e 2018 (APÊNDICE 2). Os coeficientes determinados na etapa de calibração (a_0 , a_1 e a_2) foram os mesmo utilizados para as estimativas de temperatura e umidade relativa do ar especializadas na validação, no período entre 2016 e 2018. Os coeficientes a_0 , a_1 e a_2 foram escolhidos baseando-se no melhor desempenho obtido com os procedimentos, considerando as estações individuais ou agrupadas. Os desempenhos das associações foram avaliados conforme os erros, índice e coeficientes estatísticos apresentados no Item 2.4.8.

2.4.5 Estimativa das variáveis climáticas com dados de sensoriamento remoto

a) Temperatura da superfície (T_s)

A temperatura da superfície (T_s) foi estimada utilizando a banda 10 (fração infravermelho termal do espectro eletromagnético) do satélite Landsat 8, captada com o sensor *Thermal Infrared Sensor (TIRS)*, com resolução espacial 30 m (pixel de dimensão 30 x 30 m). Para isso foram necessárias as seguintes etapas:

- i) O valor do pixel de cada imagem da banda 10 foi calibrado para radiância espectral e convertido para valores de temperatura da superfície (T_s);
- ii) Cada valor DN (Numero Digital do pixel) da banda do infravermelho termal foi convertida em valores de radiância espectral conforme a expressão (USGS, 2019):

$$L_\lambda = M_L \cdot Q_{cal} + A_L \quad (5)$$

Sendo: L_λ ⁽¹⁾ – radiância espectral no topo da atmosfera TOA ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$); M_L – fator de redimensionamento multiplicativo específico da banda dos metadados ($M_L = 0,0003342$; adimensional); Q_{cal} – valor do número digital DN quantificado por pixel da banda (adimensional); A_L – fator de redimensionamento aditivo específico da banda dos metadados ($A_L = 0,1$; adimensional);

- iii) Os valores dos pixels calibrados para radiância da banda 10 foram convertidos em temperatura da superfície conforme a expressão (USGS, 2019):

(1) Segundo Inmetro (2014) o esferorradiano simbolizada por “sr” é uma medida de ângulo sólido. É um nome especial que refere-se a uma unidade derivada de “um”, como por exemplo, representa $m^2 m^{-2}$, uma grandeza adimensional. D'Angelo (2004) descreve “sr” como sendo igual a razão da área de uma porção de uma casca esférica pelo raio ao quadrado dessa esfera.

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} - 273 \quad (6)$$

Sendo: T_s – temperatura da superfície obtida com o satélite (°C); $L_\lambda^{(1)}$ – radiância espectral no TOA ($W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$); K_1 e K_2 – constantes de conversão térmica específica da banda dos metadados, que são parâmetros fixos para banda 10 do Landsat 8 ($K_1 = 774,8853$, adimensional; e $K_2 = 1321,0789$, adimensional). A subtração do valor 273 é realizada para converter a temperatura de Kelvin em graus Celsius.

Realizado os procedimentos *i* a *iii* descritos, tem-se a conversão das imagens brutas (pixels com valores de números digitais) para imagens de T_s . As coordenadas das estações meteorológicas foram espacializadas, no formato de pontos. No pixel onde o ponto foi localizado, atribuiu-se à coordenada o valor de temperatura encontrado na imagem. Os valores coletados foram tabulados em planilhas eletrônicas, para o ajuste das equações de regressão. O processamento para extração da T_s foi realizado com o *software* Qgis 3.10, conforme os procedimentos:

iv) Reprojeção das imagens da banda 10 (termal) para o Sistema de Referência Cartográfica: Sirgas 2000 / UTM zona 22 Sul (EPSG: 31982);

v) Na calculadora raster do *software* Qgis transformou-se a banda 10 (originalmente em números digitais) em imagem com radiância espectral (Equação 5);

vi) Na calculadora raster a imagem de radiância foi transformada em imagem com valores de temperatura em graus Celsius (Equação 6);

vii) Adição dos valores de temperatura do pixel da imagem Landsat para os pontos das estações meteorológicas das mesmas imagens. Para que cada imagem (T_s) correspondesse ao dado *shapefile* (ponto) de estação meteorológica ($T_{m_{EM}}$) de mesma data, organizou-se o banco de dados com nome dos arquivos iniciando pela data de aquisição, facilitando a correspondência entre imagem e pontos obtidos na mesma data. Para adicionar o valor T_s da imagem ao ponto utilizou-se a ferramenta “*Add raster values to points*”;

viii) O arquivo no formato de pontos gerado foi salvo em planilha eletrônica para alimentar o banco de dados, possibilitando a associações “ T_s vs $T_{m_{EM}}$ ” e “ Wp vs T_s vs $T_{m_{EM}}$ ”.

“Módulos de Processamento” foram desenvolvidos no *software* Qgis para auxiliar e otimizar os processamentos de análise espacial necessários. Todos os detalhes da estruturação dos módulos estão no disponíveis no APÊNDICE 3.

b) Temperatura do ar espacializada ($T_{e_{SR}}$)

A estimativa da $T_{e_{SR}}$ foi realizada utilizando-se os coeficientes calibrados, resultante das associações “ T_s vs Tm_{EM} (Equação 1)” e “ Wp vs T_s vs Tm_{EM} (Equação 2)”.

c) Coluna total de vapor d’água precipitável (Wp)

A obtenção da umidade relativa do ar diretamente com dados remotos ainda não é possível (Liu et. al., 2017). O dado remoto mais próximo para estimar a umidade relativa consiste em utilizar o vapor de água atmosférico precipitável (Wp), registrado com o sensor MODIS abordo do satélite Aqua.

Para a estimativa da Wp foram utilizadas as imagens do satélite Aqua MODIS, do produto MYD05_L2, que refere-se à coluna total de vapor d’água precipitável (Wp ; cm), tendo resolução de 1,3 km. A estimativa da Wp consistiram nas seguintes etapas:

- i) As imagens do produto MYD05 encontram-se no formato hdf, sendo necessário transformá-las para o formato geotiff, extensão suportada pelo Qgis para processamento de imagem. A transformação do dado raster foi feita por meio de *script* em linguagem Python (APÊNDICE 1), que foi executada no *software* SIG.
- ii) A imagem transformada sai com os valores de cada pixel na unidade de coluna de vapor d’água, em cm (Wp). Com a imagem transformada, adicionou-se o valor Wp da imagem ao ponto correspondente da estação meteorológica de mesma data de aquisição, com a ferramenta “*Add raster values to points*”, conforme mencionado anteriormente;
- iii) O arquivo no formato de pontos gerado foi salvo em planilha eletrônica para alimentar o banco de dados, a fim de possibilitar as associações “ Wp vs URm_{EM} ” e “ Wp vs T_s vs URm_{EM} ” para estimar a $UR_{e_{SR}(wp)}$.

d) Umidade relativa do ar espacializada ($UR_{e_{SR}}$)

A estimativa da $UR_{e_{SR}}$ foi realizada utilizando-se os coeficientes calibrados, obtidos das associações “ Wp vs URm_{EM} (Equação 3)” e “ Wp vs Ts vs URm_{EM} (Equação 4)”.

2.4.6 Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o)

a) ET_o estimada com metodologia padrão

O modelo Penman-Monteith ASCE (ASCE-EWRI, 2005; APÊNDICE 4) foi calculado utilizando dados diários medidos nas estações meteorológicas ($ET_{o_{PM}}$). O modelo foi considerado padrão para a comparação com outros modelos alternativos testados, que foram calculados com as variáveis meteorológicas espacializadas ($T_{e_{SR}}$ e $UR_{e_{SR}}$) como entrada.

$$ET_{o_{PM}} = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma \cdot \frac{Cn}{(T + 273)} \cdot u_2 \cdot (es - ea)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + Cd \cdot u_2)}$$

Sendo: $ET_{o_{PM}}$ – evapotranspiração de referência calculada com o modelo Penman-Monteith ASCE (mm dia⁻¹); Δ – declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar (kPa °C⁻¹); Rn – saldo de radiação diário (MJ m⁻² dia⁻¹); G – balanço do fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹); γ – constante psicrométrica (kPa °C⁻¹); T – temperatura média diária do ar (°C); Cn – constante do numerador relacionada à superfície de referência e intervalo de tempo adotados ($Cn = 900$ kJ⁻¹ kg K para culturas de porte baixo); Cd – coeficiente de vento para a cultura de referência ($Cd = 0,34$ kJ⁻¹ kg K); es – pressão de saturação de vapor d’água (kPa); ea – pressão atual de vapor d’água (kPa); u_2 – velocidade média diária do vento a dois metros de altura (m s⁻¹).

b) ET_o estimada com metodologia alternativa

A $T_{e_{SR}}$ e $UR_{e_{SR}}$ estimadas com modelo de regressão linear (simples e múltiplo) de melhor resultado (conforme índices estatísticos) serviram de entrada para o cálculo dos modelos de evapotranspiração de referência (ET_o) alternativos testados: Moretti-Jerszurki-Silva ($ET_{o_{MJS(\psi_{ar};Ra)}}$); Camargo (ET_{o_c}); Thornthwaite ($ET_{o_{TW.dc}}$):

– **Modelo Moretti-Jerszurki-Silva** (Jerszurki et al., 2017): O método considera o potencial hídrico atmosférico (ψ_{ar}) e radiação solar no todo da atmosfera (Ra). Os coeficientes a e b foram calibrados com as 120 observações das variáveis climáticas (T_{med} e UR_{med}) medidas em estações meteorológicas para o período de tempo analisado no estudo (2014 a 2018). O método dos mínimos quadrados e a ferramenta *solver* de uma planilha eletrônica foram utilizados no ajuste dos coeficientes (a e b).

$$ET_{O_{MJS}(\psi_{ar};Ra)} = a + b \cdot Ee_i \quad (7)$$

$$Ee_i = k_{\psi_{ar}} \cdot \frac{Ra_i}{\lambda} \quad (8)$$

$$k_{\psi_{ar}.i} = \left| \frac{\psi_{ar.i} - \psi_{ar.min}}{\psi_{ar.max} - \psi_{ar.min}} \right| \quad (9)$$

$$\psi_{ar.i} = \frac{R \cdot T}{M_v} \cdot \ln\left(\frac{ea}{es}\right) = 0,46191456 \cdot T \cdot \ln(UR) \quad (10)$$

$$Ra_i = \frac{1440}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot d_r \cdot [(\omega_s \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta) + (\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s)] \quad (11)$$

$$\omega_s = \arccos [-\tan \varphi \cdot \tan \delta] \quad (12)$$

$$\delta = 0,409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J - 1,39\right)$$

Sendo: $ET_{O_{MJS}(\psi_{ar};Ra)}$ – evapotranspiração de referência estimada com o modelo Moretti-Jerszurki-Silva (mm dia^{-1}); a – coeficiente linear da equação de regressão obtido da associação “ ψ_{ar} vs $ET_{O_{PM}}$ ” (mm dia^{-1}); b – coeficiente angular da equação de regressão obtido da associação “ ψ_{ar} vs $ET_{O_{PM}}$ ” (adimensional); Ee_i – evaporação equivalente de água no i -ésimo dia (mm dia^{-1}); $K_{\psi_{ar}.i}$ – coeficiente de proporcionalidade do potencial hídrico atmosférico do i -ésimo dia (adimensional); Ra_i – radiação solar no topo da atmosfera no i -ésimo dia ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$; Allen et al., 2000); λ – calor latente de vaporização da água ($2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$); $\psi_{ar.i}$ – potencial hídrico atmosférico no i -ésimo dia (MPa); $\psi_{ar.max}$ – potencial hídrico atmosférico máximo encontrado no período analisado (MPa); $\psi_{ar.min}$ – potencial hídrico atmosférico mínimo encontrado no período analisado (MPa); R – Constante universal dos gases perfeitos ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$); T – temperatura média do ar do período considerado (K); M_v – Massa molar da água ($18 \cdot 10^{-1} \text{ m}^3 \text{mol}^{-1}$); ea –

pressão atual do vapor do período considerado (MPa); e_s – pressão de saturação de vapor do período considerado (MPa); UR – umidade relativa do ar (adimensional); G_{SC} – constante solar ($G_{SC} = 0,0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$); dr – distancia relativa Terra-Sol (adimensional); ω_s – ângulo horário correspondente ao pôr do Sol (radianos); φ – latitude do local (radianos); δ – declinação solar (radianos); J – dia Juliano (adimensional).

A espacialização da Ra variou em função do dia Juliano (J ; dias) e latitude local (φ ; radianos), conforme Equação 11. Os valores de J e φ foram espacializados com o modulo de processamento criado no Qgis. O ψ_{ar} foi gerado com a entrada das imagens de Te_{SR} e URe_{SR} , representando T e UR , respectivamente, na Equação 10. Com $\psi_{ar.min}$ e $\psi_{ar.max}$ obtidos no período de estudo, estimou-se $k_{\psi_{ar}}$ com a Equação 9. A Ee pode ser calculada com as imagens geradas de Ra e $k_{\psi_{ar}}$, de acordo com a Equação 8. Por fim, com Ee espacializada e coeficientes a e b do modelo MJS calibrados, obteve-se $ET_{O_{MJS}(\psi_{ar};Ra)}$ distribuída espacialmente (Equação 7).

– **Modelo de Camargo (1971):**

$$ET_{O_C} = \left(\frac{Ra}{2,45} \right) \cdot F \cdot T \cdot ND$$

Sendo: ET_{O_C} – evapotranspiração de referência estimada com o modelo de Camargo (1971) (mm dia^{-1}); F – fator de ajuste devido a temperatura média anual do local para o período entre 2014 e 2018, das oito estações utilizadas no estudo (adimensional; como a temperatura média na BHRT é inferior a $23,5 \text{ }^\circ\text{C}$, adotou-se $F = 0,01$); Ra – radiação solar no topo da atmosfera calculado conforme Equação 11 (mm dia^{-1}); G_{SC} – constante solar ($0,0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$); T – temperatura média diária do ar, considerada igual a Te_{SR} para a espacialização da evapotranspiração de referência ($^\circ\text{C}$); ND – número de dias do período analisado (número inteiro).

– **Modelo Thornthwaite (1948) corrigido:**

$$ET_{O_{TW.mc}} = ET_{O_{TW.m}} \cdot \frac{N}{12} \cdot \frac{ND}{30}$$

$$ET_{O_{TW.m}} = 16 \cdot \left(10 \cdot \frac{T_m}{I} \right)^a \quad \text{sendo } T_i > 0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49239$$

$$I = \sum_{m=1}^{12} (0,2 \cdot Tm_N)^{1,514} \quad \text{sendo } Tm_N > 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$N = \frac{24}{\pi} \cdot \omega_s \quad (13)$$

Sendo: $ETo_{TW.mc}$ – evapotranspiração de referência corrigida para um m -ésimo mês de ND dias e N horas de fotoperíodo, estimada com o modelo de Thornthwaite (mm mês^{-1}); $ETo_{TW.m}$ – evapotranspiração de referência para um m -ésimo mês de 30 dias e fotoperíodo de 12 horas, estimada com o método de Thornthwaite (mm mês^{-1}); N – duração máxima da insolação diária (h dia^{-1}); ND número de dias do m -ésimo mês (dias); T_m – temperatura média mensal do m -ésimo mês do ano, considerada igual a T_{eSR} para a espacialização da evapotranspiração de referência ($^\circ\text{C}$); I – índice de calor da região (adimensional); a – função cúbica do índice de calor I da região; Tm_N – temperatura média climatológica do m -ésimo mês ($^\circ\text{C}$; Calculada com os valores de temperatura média normal do local/região onde se encontra a Bacia Hidrográfica do Tibagi, INMET, 2020); ω_s – ângulo horário correspondente ao pôr do Sol (radianos; calculado conforme a Equação 12).

O valor da $ETo_{TW.mc}$ posteriormente foi dividido pelo ND do m -ésimo mês em questão, para obter o valor para o período de um dia ($ETo_{TW.dc}$; mm dia^{-1}).

$$ETo_{TW.dc} = \frac{ETo_{TW.mc}}{ND}$$

2.4.7 Validação da ETo estimada com sensoriamento remoto

A validação consistiu nas associações: “ $ETo_{PM-ASCE}$ vs $ETo_{MJS(Ra; \psi_{ar})}$ ”; “ $ETo_{PM-ASCE}$ vs ETo_C ”; e “ $ETo_{PM-ASCE}$ vs $ETo_{TW.dc}$ ”. As estimativas da ETo com os modelos padrão e alternativos foram realizadas utilizando os dados meteorológicos e de sensoriamento remoto, respectivamente, do período entre 2016 e 2018.

2.4.8 Análises estatísticas

Validações foram realizadas com associações entre: Valores medidos de temperatura e umidade relativa do ar em estações meteorológicas, com os estimados por sensoriamento remoto; e, Valores de ETo estimada espacialmente, e

a calculada com o método padrão Penman-Monteith ASCE utilizando dados das estações meteorológicas. Os índices, erros e coeficientes foram calculados conforme Souza (2018):

– Índice de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (*NSE*):

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \right]$$

– Índice de concordância “*d*”:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right]$$

– Raiz do erro quadrático médio (*RMSE*):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{n}}$$

– Erro relativo percentual absoluto médio (*ERPAM*_%):

$$ERPAM_{\%} = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{E_i - O_i}{O_i} \cdot 100 \right|}{n}$$

– Coeficiente de correlação de Pearson (*r*):

$$r = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}}$$

Sendo: *NSE* – índice de eficiência de *Nash-Sutcliffe*; *d* – índice “*d*” de concordância de Willmott et al. (1985) (adimensional); *RMSE* – raiz do erro quadrático médio (tem a unidade da variável); *ERPAM*_% – erro relativo percentual absoluto médio (%); *r* – coeficiente de correlação de Pearson (adimensional); *E_i* – *i*-ésimo valor estimado da variável dependente, com os dados remotos (tem a unidade da variável); *O_i* – *i*-ésimo valor observado da variável independente, obtida das estações meteorológicas (tem a unidade da variável); \bar{O} – média dos valores observados da variável independente, obtida das estações meteorológicas (tem a unidade da variável); *n* – número de dados observados.

Para testar se o valor de r é estatisticamente igual ao coeficiente de correlação populacional (ρ ; igual à zero), aplicou-se o teste de hipótese:

$$H_0: \rho = 0$$

$$H_1: \rho \neq 0$$

Os valores do teste t de *Student* foram comparados com os valores de t calculado (t_{calc}) com a expressão:

$$t_{calc} = \frac{r - \rho}{\sqrt{\frac{1 - r^2}{v}}}$$

$$v = n - p - 1$$

Sendo: t_{calc} – valor de t calculado (adimensional); r – coeficiente de correlação da amostra (adimensional); ρ – coeficiente de correlação da população (adimensional); v – graus de liberdade (adimensional); r^2 – coeficiente de determinação (adimensional); n – número de dados da análise de regressão (adimensional); p – número de parâmetros da regressão (adimensional; para regressão linear simples tem apenas o parâmetro a_1)

O teste t foi calculado com auxílio de uma planilha eletrônica. No cálculo do $t_{critico}$ (tabelado) foi utilizada a função referente ao inverso da distribuição de t bicaudal. O nível de significância do valor de r foi testado a 99%(**) de significância. Não atendendo o requisito testou-se a 95%(*), e não atendendo ambos critérios o valor de r foi considerado não-significativo^(ns).

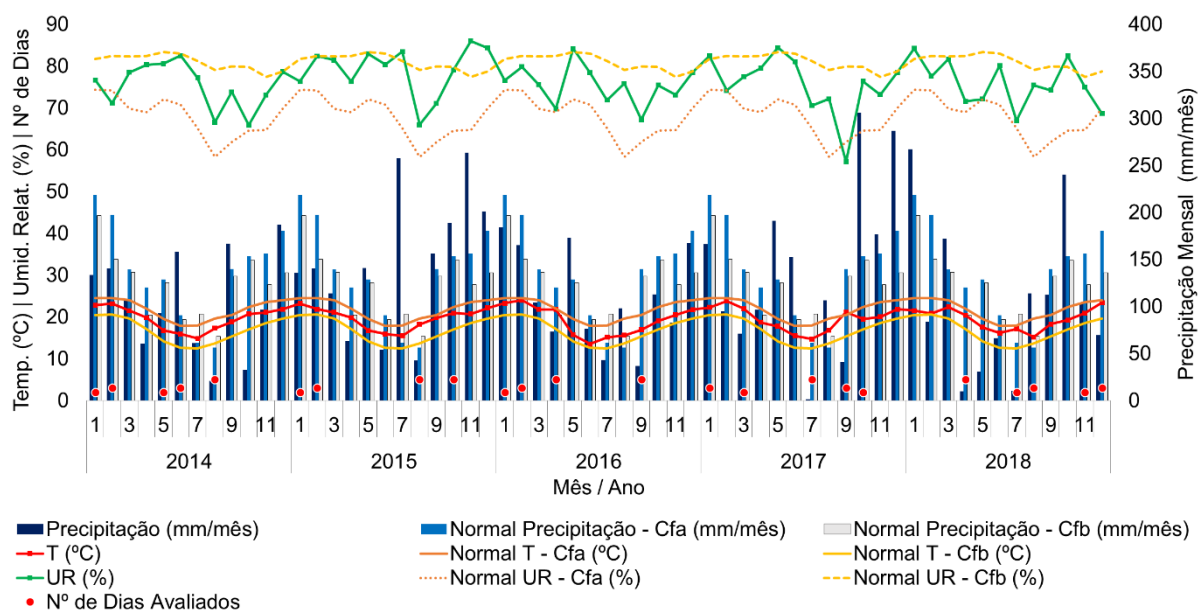
2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.5.1 Caracterização climática e fisiográfica da BHRT

A caracterização climática do período de estudo é importante para verificar a tendência das variáveis, como temperatura (T), umidade relativa do ar (UR) e precipitação (P). A variação temporal da temperatura e umidade relativa do ar influenciam fortemente a estimativa da ET_o em modelos que utilizem essas variáveis (Maček et al., 2018; Ahmadi e Javanbakht, 2020). As estações Maringá e Castro foram escolhidas para representar as variações dos climas Cfa e Cfb na BHRT, respectivamente, por conterem suas medidas mais próximas das Normais

Climatológicas das estações estudadas (FIGURA 2.2). No APÊNDICE 5 encontram-se maiores detalhes sobre os valores mensais de T , UR , P e número de dias avaliados na estação meteorológica analisadas, para todos os dias no período entre 2014 e 2018, na bacia hidrográfica do Tibagi (BHRT), bem como as normais climatológicas dos tipos climáticos das estações.

FIGURA 2.2 – VALORES MENSAIS DE TEMPERATURA MÉDIA (T) E UMIDADE RELATIVA MÉDIA (UR) DO AR, PRECIPITAÇÃO E NÚMERO DE DIAS AVALIADOS EM CINCO ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS (FPO-IPR, LDA-IPR E CAS-IMT, NFT-IMT, VTN-IMT), PARA TODOS OS DIAS NO PERÍODO ENTRE 2014 E 2018, NA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIBAGI (BHRT), E NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DOS CLIMAS Cfa (MARINGÁ) e Cfb (CASTRO).



FONTE: O Autor (2020); INMET (2020)

A FIGURA 2.2 foi gerada apenas para cinco das oito estações avaliadas, pois as estações do SIMEPAR não dispunham de dados de precipitação. Em média, 60% dos dias entre 2014 a 2018 não apresentaram precipitação, o que pode ter contribuído para que a média mensal (122 mm) ficasse abaixo da precipitação Normal climatológica mensal para o clima Cfa (137 mm) e Cfb (124 mm). IAT (2009) registrou precipitação média mensal de 130 mm para a BHRT, e Zimmermann et al. (2008), entre 2005 e 2006, verificaram valores de precipitação mensais superiores (200 mm mês^{-1}). Embora com alguma variação, pode-se considerar que os valores mensais e Normais da bacia estão de acordo com a literatura.

A precipitação pluviométrica seguiu tendência dentro da normalidade para os tipos climáticos da BHRT, tendo alguns meses acima da média, com destaque para

julho e novembro de 2015, outubro e dezembro de 2017 e janeiro de 2018. Os picos de precipitação nesses meses podem ter contribuído para ocorrência de umidade relativa superior à esperada no clima *Cfb*. Lu e Takle (2010) consideram que a umidade relativa está bem correlacionada positivamente à precipitação.

A temperatura média do ar foi a variável com tendência mais próxima da normalidade (19,4 °C), sendo 21,7 e 16,8 °C a Normal climatológica para os tipos climáticos *Cfa* e *Cfb*, respectivamente. A umidade relativa média do ar também se manteve dentro da normalidade (76,3%), sendo 67,9 e 80,9% a Normal climatológica para os tipos climáticos *Cfa* e *Cfb*, respectivamente. Medri et al. (2002) obtiveram para a BHRT valores de T (19,6 °C) e UR (75%) muito próximos aos encontrados no presente estudo. Na FIGURA 2.2 verificou-se tendências crescente para UR e decrescentes para T , principalmente no período de janeiro a abril dos anos 2014 e 2015, indicando correlação negativa entre as variáveis (T e UR). Este padrão também foi observado por Shi et al. (2018) e Lu e Takler (2010).

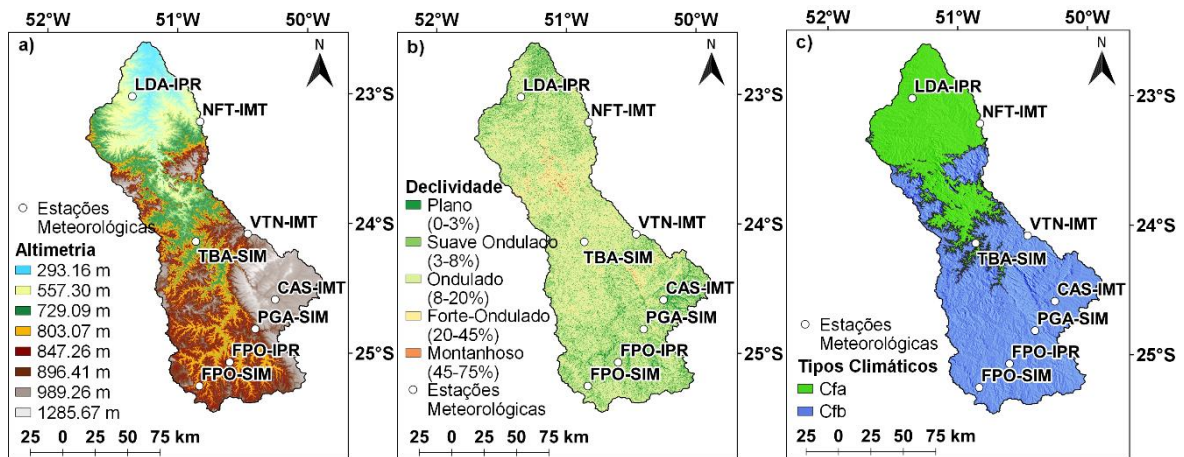
A BHRT tem área de 25000 km² e apresenta diferença considerável de altitude, tendo: 293,2 m de altitude mínima; 1285,7 m de altitude máxima; e amplitude de 992,5 m (FIGURA 2.3a). Apesar da diferença, a BHRT tem a maior parte de seu relevo variando de plano a suave ondulado (FIGURA 2.3b), devido às transições de altitude serem mais compridas que íngremes. Como a altitude influencia o clima, verificou-se que o limite entre os tipos climáticos (FIGURA 2.3c) segue a cota com 729 m de altitude, com o clima *Cfa* ocorrendo predominantemente abaixo e o *Cfb* acima.

O número de dias avaliados na pesquisa (FIGURA 2.2) ficaram bem distribuídos no período analisado. Geralmente, a precipitação pluviométrica e médias da temperatura e umidade relativa do ar apresentaram tendência próxima às normais climatológicas. Dessa forma, acredita-se que os dados escolhidos para calibração dos coeficientes dos modelos lineares (simples e múltiplo) apresentaram a tendência climática Normal da BHRT, sendo os coeficientes representativos para estimar a Te_{SR} e UR_{eSR} na região estudada.

Acredita-se que a distribuição espacial e altitude das estações escolhidas representaram os tipos climáticos *Cfa* e *Cfb* quanto à variabilidade necessária para

calibração dos coeficientes dos modelos lineares (simple e múltiplo), caracterizando bem o ambiente de toda a BHRT.

FIGURA 2.3 – CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TIBAGI (BHRT), PARA: a) ALTIMETRIA; b) DECLIVIDADE; E, c) TIPO CLIMÁTICO.



FONTE: O Autor (2020), EARTHEXPLORER (2020), ALVARES et al. (2013).

2.5.2 Calibração dos modelos lineares simples e múltiplo

Os modelos lineares simples e múltiplo foram utilizados para estimar as variáveis (temperatura e umidade relativa média do ar) que serviram de entrada para as equações de estimativa da ET_o com modelos alternativos. Os testes com as equações de regressão de forma individual, para cada estação, e uma única equação geral (RG) que representasse conjuntamente todas as estações (dados do período entre 2014 a 2015), foram importantes para verificar resultados e diferenças entre os coeficientes calibrados (TABELA 2.2).

As regressões gerais (RG) para a temperatura (simple e múltiplo) foram significativas estatisticamente, e a regressão linear múltiplo mostrou-se mais estreita ($r = 0,90$). Os r das equações individuais (simple e múltiplo) das estações foram 4% superiores em média à RG, o que permite afirmar a semelhança entre os métodos (individual e geral). Desta forma, optou-se pela utilização da equação RG para estimar a Te_{SR} , por simplificar o modelo de automação no cálculo da ET_o especializada. Vale ressaltar que os coeficientes a_2 , a_1 e a_0 das equações individuais, em relação à equação geral, foram bem distintos. Porém, as equações obtiveram valores de correlações próximos, evidenciando que a dependência entre

as variáveis associadas foi semelhante, independente dos dados (meteorológicos e remotos) serem organizados e avaliados de forma individual ou conjuntamente.

Pelta e Chudnovsky (2017) utilizaram modelo misto de regressão para estimar a temperatura espacializada (associando dados remotos e medidos) e obtiveram $r = 0,96$, valor próximo ao da RG encontrado para $Te_{SR(Wp;Ts)}$ (TABELA 2.2). Os valores de r da $Te_{SR(Wp;Ts)}$ foram maiores que da $Te_{SR(Ts)}$, pois a oscilação diária da temperatura do ar depende de outras variáveis atmosféricas, como umidade relativa, velocidade do vento, radiação solar incidente, entre outros (Kloog et al., 2012). Logo, a utilização da Wp possibilitou melhoria na significância das equações para a estimativa da temperatura com sensoriamento remoto (Te_{SR} ; Tabela 2.2).

TABELA 2.2 – EQUAÇÕES CALIBRADAS PARA TEMPERATURA MÉDIA E UMIDADE RELATIVA MÉDIA DO AR, ESPECIALIZADAS PARA OS MODELOS LINEARES SIMPLES E MÚLTIPLO.

Estações	Modelos Testados						
	Regressão Linear Simples			Regressão Linear Múltipla			
	a_1	a_0	r	a_2	a_1	a_0	r
----- Temperatura (°C) -----							
	$Tm_{EM} vs Ts$			$Tm_{EM} vs Ts vs Wp$			
	$Te_{SR(Ts)} = a_1 \cdot Ts + a_0$			$Te_{SR(Wp;Ts)} = a_2 \cdot Wp + a_1 \cdot Ts + a_0$			
FPO-IPR	1,16	-4,71	0,89*	2,50	0,86	-4,70	0,97**
LDA-IPR	0,25	17,53	0,53 ^(ns)	1,31	0,36	9,97	0,94**
CAS-IMT	0,73	0,88	0,98**	0,67	0,62	1,93	0,99**
NFT-IMT	0,56	8,51	0,85*	0,47	0,53	7,95	0,93**
VTN-IMT	0,83	0,53	0,92**	2,11	0,42	3,94	0,96**
FPO-SIM	0,59	7,65	0,79 ^(ns)	3,58	0,48	0,56	0,99**
PGA-SIM	0,76	1,45	0,94**	1,98	0,54	1,30	0,97**
TBA-SIM	0,82	-0,66	0,92**	-0,39	0,88	-1,27	0,92**
RG ⁽¹⁾	0,70	4,04	0,82**	1,75	0,52	3,25	0,90**
----- Umidade Relativa (%) -----							
	$URm_{EM} vs Wp$			$URm_{EM} vs Wp vs Ts$			
	$UR_{eSR(Wp)} = a_1 \cdot Wp + a_0$			$UR_{eSR(Wp;Ts)} = a_2 \cdot Wp + a_1 \cdot Ts + a_0$			
FPO-IPR	3,32	61,52	0,39 ^(ns)	6,70	-1,54	84,35	0,76 ^(ns)
LDA-IPR	6,89	34,41	0,68 ^(ns)	4,93	-1,97	88,98	0,93**
CAS-IMT	0,39	73,70	0,14 ^(ns)	3,92	-0,87	85,31	0,81 ^(ns)
NFT-IMT	6,19	49,22	0,44 ^(ns)	7,34	-5,13	175,66	0,79 ^(ns)
VTN-IMT	-2,62	73,95	0,29 ^(ns)	3,71	-1,58	92,07	0,48 ^(ns)
FPO-SIM	2,25	67,63	0,28 ^(ns)	3,76	-0,84	80,04	0,85 ^(ns)
PGA-SIM	-3,20	83,44	0,52 ^(ns)	1,90	-0,98	92,40	0,86 ^(ns)
TBA-SIM	-2,11	81,80	0,51 ^(ns)	-0,41	-0,61	92,88	0,70 ^(ns)
RG ⁽¹⁾	-0,42	71,68	0,05 ^(ns)	1,74	-0,97	87,85	0,46**

⁽¹⁾RG – Regressão Geral, ajuste considerando todas as estações juntas, tendo população $n = 48$; ** Teste de significância t de Student a 99% de probabilidade; * Teste de significância t de Student a 95% de probabilidade; ^(ns) não significativo para o teste t de Student. FONTE: O Autor (2020).

Comparado às equações ajustadas para temperatura, as RGs da umidade relativa tiveram desempenho inferior. Entre os modelos de regressão analisados para estimar a $UR_{e_{SR}}$, o melhor foi o linear múltiplo. As equações individuais não obtiveram correlação significativa, exceto para estação LDA-IPR, inviabilizando a sua utilização. A regressão geral (RG) obteve correlação estatística significativa, apresentando resultado melhor que as equações individuais. Mas a correlação não foi muito estreita ($r = 0,46$). Dessa forma, a estimativa da $UR_{e_{SR}(Wp;Ts)}$ só se mostrou possível com a equação RG.

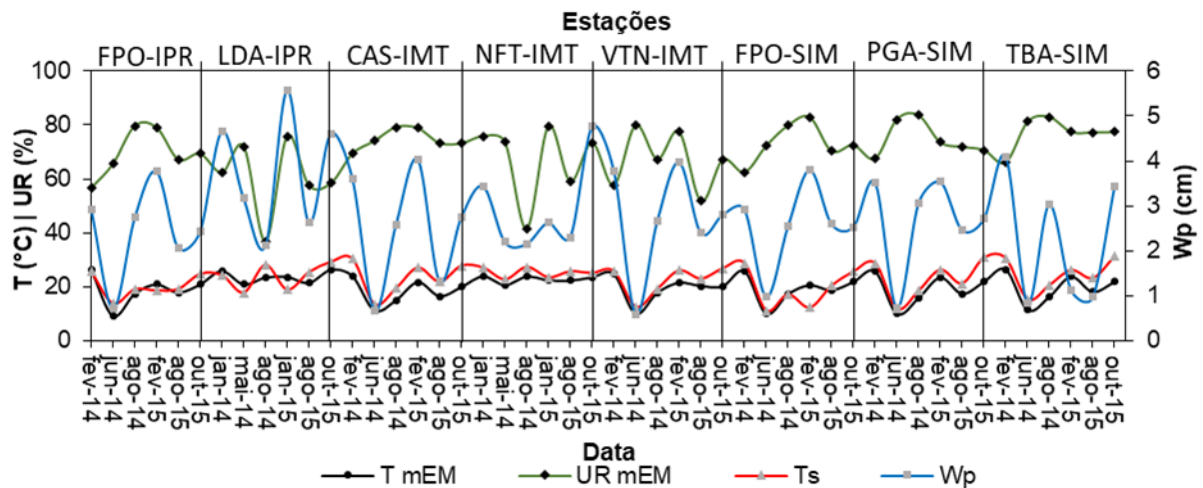
Os resultados de baixo desempenho das equações para estimar a $UR_{e_{SR}}$ pode estar relacionado às condições de céu nublado, que prejudicam a estimativa do vapor de água precipitável, visto que o infravermelho próximo (de onde é derivada a Wp) não consegue penetrar nas nuvens, ficando retido (Ji et al., 2017). Conforme os dados das estações LDA-IPR e FPO-IPR, os valores de insolação e precipitação indicaram que houve dias nublados, afetando negativamente a estimativa de Wp e, por consequência, a $UR_{e_{SR}}$. Em média, a insolação (n) correspondeu a 70% (9,5 h) da duração máxima da insolação diária (N ; Equação 13), e em média houve 100 mm de chuva nos dias avaliados (FIGURA 2.2).

Comparado com as equações individuais (Tabela 2.2), além das RGs apresentarem relações estatísticas significativas para estimativas da $Te_{SR}(Wp;Ts)$ e $UR_{e_{SR}(Wp;Ts)}$, a utilização de apenas uma equação para calcular as variáveis com sensoriamento remoto é mais interessante operacionalmente. Considerar uma equação para cada estação implicaria em alguns entraves e questionamentos, como: i) Dificuldade para interpolar dados de cada estação para definir a zona influencia, na qual seria aplicada à respectiva equação de regressão; ii) Dificuldade para aplicar a equação de regressão de cada estação, conforme Equações 2 e 4, apenas na zona de alcance da estação, resultando em uma imagem com Te_{SR} e outra com $UR_{e_{SR}}$, respetivamente.

A Tm_{EM} e Ts tiveram tendências semelhantes no período analisado, sendo que na maior parte da série temporal a Ts foi superior a Tm_{EM} (cerca de 12%), exceto em fevereiro de 2015 na estação FPO-SIM (FIGURA 2.4). Como no presente estudo, a $Ts > Tm_{EM}$ também foi identificada por Gholamnia et al. (2017). A temperatura de superfície tende a ser mais elevada em relação à temperatura do ar,

pois dependendo da condutividade térmica do solo a energia térmica é passada de molécula a molécula por condução, mediante o gradiente de temperatura (Rees et al, 2000).

FIGURA 2.4 – SÉRIE TEMPORAL DOS DADOS AVALIADOS PARA CALIBRAÇÃO DAS VARIÁVEIS, DISTRIBUÍDOS POR ESTAÇÕES: DADOS MEDIDOS EM ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS (T_{mEM} e UR_{mEM}) E ESTIMADOS COM SENSORIAMENTO REMOTO (T_s e Wp).



(¹) FPO-IPR – Fernandes Pinheiro (IAPAR); LDA-IPR – Londrina (IAPAR); CAS-IMT – Castro (INMET); NFT-IMT – Nova Fátima (INMET); VTN-IMT – Ventania (INMET); FPO-SIM – Fernandes Pinheiro (SIMEPAR); PGA-SIM – Ponta Grossa (SIMEPAR); TBA-SIM – Telêmaco Borba (SIMEPAR). FONTE: O Autor (2020).

Nas estações FPO-IPR, LDA-IPR e FPO-SIM observou-se pontos com $T_{mEM} > T_s$ ou $T_{mEM} < T_s$, o que não ocorreu nas outras estações. As oscilações atípicas de temperatura nas estações FPO-IPR e LDA-IPR podem estar relacionadas à diferença do sensor que mede os dados de temperatura nas estações do IAPAR (R. Fuess), e INMET e SIMEPAR (Vaisala).

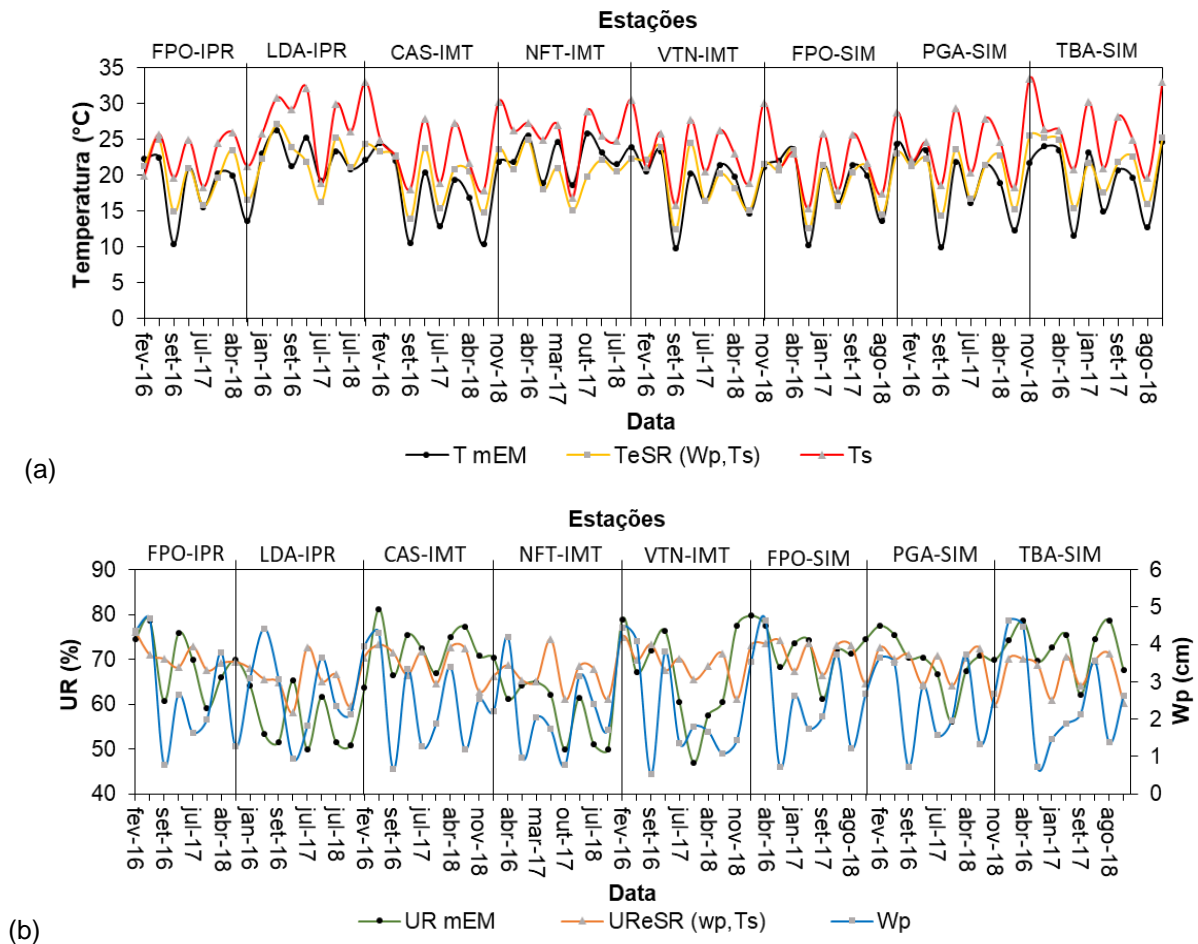
As tendências da UR_{mEM} e Wp apresentaram maiores inconsistências, com umidade relativa ascendente e vapor d'água precipitável decrescente (LDA-IPR, em janeiro de 2014; CAS-IMT, em outubro de 2015; PGA-SIM, em agosto e outubro de 2015). As divergências podem ter ocorrido devido às condições de céu nublado no momento da aquisição da imagem, alterando a tendência de Wp . Notou-se um padrão nos meses de junho de 2014 e 2015, período de inverno, em que a Wp foi baixa, resultado da menor precipitação combinada às baixas temperaturas (FIGURA 2.4), evidenciando correlação positiva entre vapor d'água e precipitação (Lu e Takle, 2010). Apesar das divergências em alguns pontos, UR_{mEM} e Wp apresentaram

tendência satisfatória mesmo com grandezas distintas. É importante considerar que Tm_{EM} e Ts apresentaram variação temporal semelhante, mas ambas têm a mesma unidade de medida ($^{\circ}\text{C}$).

2.5.3 Validação dos modelos lineares simples e múltiplo

Em relação ao período entre 2014 e 2015 (FIGURA 2.4), valores de Tm_{EM} e Ts no período entre 2016 a 2018 também tiveram tendência próximas e menos pontos divergentes (FIGURA 2.5a). Desta forma, as associações entre Tm_{EM} e $Te_{SR}(Wp;Ts)$ (FIGURA 2.5a) indicaram boa correlação ($r = 0,87$) entre valores medidos e estimados. Como a Ts é registrada apenas no momento de passagem do satélite pelo local considerado (às 13 h 30 min) e a Tm_{EM} é uma média diária, considerou-se que a estimativa da temperatura com dados do satélite teve valores representativos para a média do dia.

FIGURA 2.5 – SÉRIE TEMPORAL DOS DADOS AVALIADOS NA VALIDAÇÃO DAS VARIÁVEIS, DISTRIBUÍDOS POR ESTAÇÕES, MEDIDOS EM ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS (Tm_{EM} E URm_{EM}) E ESTIMADOS COM SENSORIAMENTO REMOTO ($Te_{SR}(Wp, Ts)$; Ts ; $URe_{SR}(Wp, Ts)$ E Wp ;) PARA TODAS AS ESTAÇÕES JUNTAS: a) TEMPERATURA MÉDIA DO AR; b) UMIDADE RELATIVA MÉDIA DO AR.



(1) FPO-IPR – Fernandes Pinheiro (IAPAR); LDA-IPR – Londrina (IAPAR); CAS-IMT – Castro (INMET); NFT-IMT – Nova Fátima (INMET); VTN-IMT – Ventania (INMET); FPO-SIM – Fernandes Pinheiro (SIMEPAR); PGA-SIM – Ponta Grossa (SIMEPAR); TBA-SIM – Telêmaco Borba (SIMEPAR). FONTE: O Autor (2020).

As estações LDA-IPR e NFT-IMT apresentaram valores de temperaturas mais elevadas, pois estão localizadas em regiões bem caracterizadas com clima *Cfa*, e não em uma zona de transição entre *Cfa* e *Cfb*, como ocorreu com a estação TBA-SIM (FIGURA 2.3c).

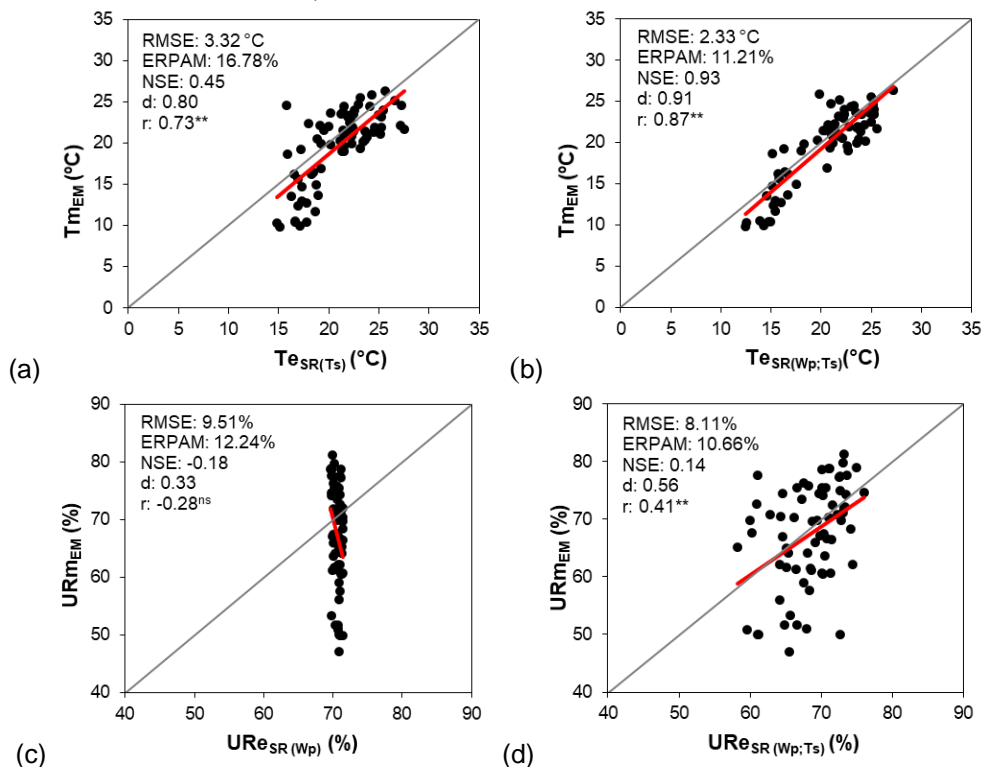
Na análise temporal da umidade relativa (FIGURA 2.5b) ocorreram maiores variações e divergências entre as associações “ Wp vs $UR_{m_{EM}}$ ” e “ $UR_{e_{SR}}$ vs $UR_{m_{EM}}$ ” testadas. Na estação LDA-IPR, em abril de 2016, enquanto o Wp aumentou a $UR_{m_{EM}}$ diminuiu, o que prejudicou a correlação entre $UR_{e_{SR}}$ e $UR_{m_{EM}}$.

Avaliando os índices estatísticos obtidos com as variáveis $T_{e_{SR}(Ts)}$ (FIGURA 2.6a) e $T_{e_{SR}(Wp;Ts)}$ (FIGURA 2.6b), observou-se melhora em todos os aspectos com o modelo linear múltiplo, sendo mais indicado para estimar com eficiência a $T_{e_{SR}}$. Li e Zha (2018) também estimando a temperatura espacializada obtiveram $r = 0,88$ e $RMSE = 2,2$ °C. Contudo, o modelo utilizado pelos autores foi o *random forest*, mais complexo que o modelo associativo usado no presente estudo.

O $r^2 = 0,75$ da associação entre “ $T_{m_{EM}}$ vs. $T_{e_{SR}(Wp;Ts)}$ ” indicou que 25% da variação da $T_{m_{EM}}$ deveu-se à outras variáveis, ligadas à precipitação, cobertura de nuvens, velocidade do vento, entre outros. O r^2 confirma que 75% das variações da $T_{m_{EM}}$ deveu-se às variáveis Ts e Wp . Não foi realizado no presente estudo, mas uma alternativa para melhorar a variação explicada do modelo consistiria na tentativa de inserir um *grid* de células contendo valores de velocidade do vento (variável não considerada no estudo), para estimar a temperatura, conforme sugerido por Pelta e Chudnovsky (2017). No entanto, diferente do estudo dos autores, com a metodologia do presente estudo seria necessário utilizar técnica de interpolação dos dados das estações meteorológicas para gerar a imagem com valores de velocidade do vento. Guo et al. (2021) considera que cada variável climática e tipo de topografia têm que ser testada para verificar o método de interpolação mais adequado. Por isso, antes de usar o dado interpolado no modelo de estimativa, é preferível testar qual método de interpolação é mais adequado para a região estudada.

O modelo que estima a $UR_{e_{SR}(Wp;Ts)}$ (linear múltiplo) obteve resultado superior ($r = 0,41$) à estimativa com o modelo $UR_{e_{SR}(Wp)}$ (linear simples), que apresentou resultado muito ruim ($r = -0,28$), sem explicação física. Entretanto, a estimativa da $UR_{e_{SR}(Wp;Ts)}$ ($r^2 = 0,17$) indicou que apenas 17% do resultado da associação “ $UR_{m_{EM}}$ vs. $UR_{e_{SR}(Wp;Ts)}$ ” deveu-se a variação da $UR_{m_{EM}}$. Logo, 83% do restante das variações ocorrem devido às variáveis não consideradas no modelo. Acredita-se que na captura da imagem MYD05 (17 h e 10 min) a cobertura de nuvens foi maior em algumas cenas, distanciando-se da condição de céu claro priorizado para as imagens Landsat, que foram capturadas às 13 h e 20 min, prejudicando o desempenho das estimativas de $UR_{e_{SR}(Wp;Ts)}$ e $UR_{e_{SR}(Wp)}$.

FIGURA 2.6 – ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR, ERROS, ÍNDICE E COEFICIENTE ENTRE MEDIDAS NA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA ($T_{m_{EM}}$ E $UR_{m_{EM}}$) E RESPECTIVAS ESTIMATIVAS COM SENSORIAMENTO REMOTO, CONSIDERANDO TODAS AS ESTAÇÕES JUNTAS, SENDO: a) “ $T_{m_{EM}}$ vs. $T_{e_{SR}(Ts)}$ ” (MODELO LINEAR SIMPLES); b) “ $T_{m_{EM}}$ vs. $T_{e_{SR}(Wp;Ts)}$ ” (MODELO LINEAR MÚLTIPLO); c) “ $UR_{m_{EM}}$ vs. $UR_{e_{SR}(Wp)}$ ” (MODELO LINEAR SIMPLES); d) “ $UR_{m_{EM}}$ vs. $UR_{e_{SR}(Wp;Ts)}$ ” (MODELO LINEAR MÚLTIPLO).



FONTE: O Autor (2020)

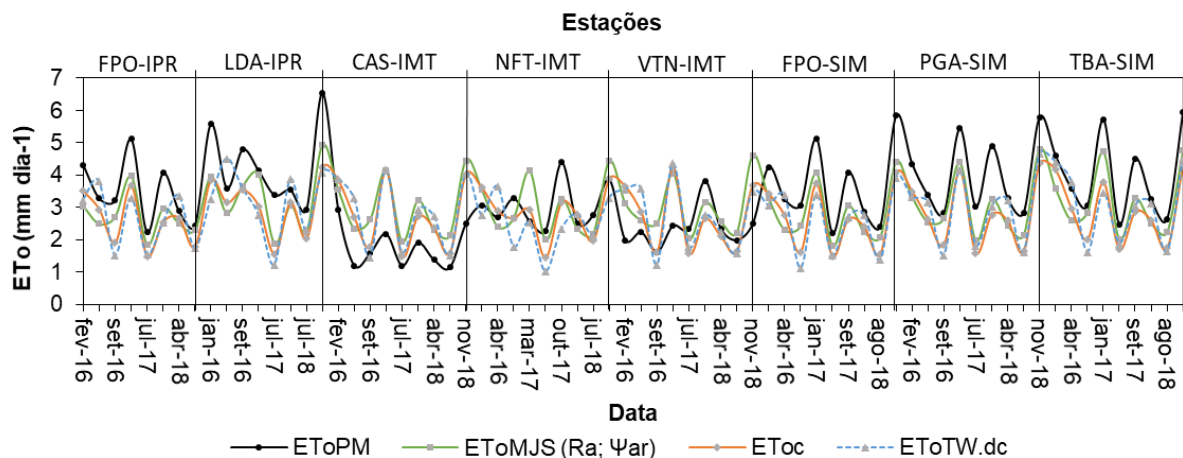
Conforme Tabela 2.2 e Figura 2.6, as variáveis temperatura do ar e umidade relativa do ar especializadas tiveram os melhores erros, índice e coeficiente estatísticos com o modelo linear múltiplo. Da mesma forma, a utilização da

regressão geral (considerando todas as estações juntas) para estimar a $T_{e_{SR}(Wp;Ts)}$ e $UR_{e_{SR}(Wp;Ts)}$ obteve melhor desempenho estatístico, bem como maior viabilidade operacional para ser aplicado em toda a BHRT. Logo, optou-se por utilizar a $T_{e_{SR}(Wp;Ts)}$ e $UR_{e_{SR}(Wp;Ts)}$ para servir de entrada para testar e avaliar os modelos alternativos de estimativa da ET_o especializada.

2.5.4 Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o)

A variação temporal indicou que a ET_{oC} , $ET_{oMJS}(Ra; \psi_{ar})$ e $ET_{oTW.dc}$ (FIGURA 2.7) tenderam a subestimar a ET_{oPM} , estimada com o método Penman-Monteith (ET_{oPM}), nas estações FPO-IPR, LDA-IPR, FPO-SIM, PGA-SIM e TBA-SIM.

FIGURA 2.7 – SÉRIE TEMPORAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA CALCULADA PARA AS ESTAÇÕES DA BHRT, COM OS MODELOS DE PENMAN-MONTEITH ASCE (ET_{oPM}), CAMARGO (ET_{oC}), THORNTHWAITE DIÁRIO CORRIGIDO ($ET_{oTW.dc}$) E MORETTI-JERSZURKI-SILVA ($ET_{oMJS}(\psi_{ar}; Ra)$).



(1) FPO-IPR – Fernandes Pinheiro (IAPAR); LDA-IPR – Londrina (IAPAR); CAS-IMT – Castro (INMET); NFT-IMT – Nova Fátima (INMET); VTN-IMT – Ventania (INMET); FPO-SIM – Fernandes Pinheiro (SIMEPAR); PGA-SIM – Ponta Grossa (SIMEPAR); TBA-SIM – Telêmaco Borba (SIMEPAR). FONTE: O Autor (2020).

Na estação CAS-IMT os modelos alternativos de estimativa da evapotranspiração testados predominantemente superestimaram a ET_{oPM} , e nas estações NFT-IMT e VTN-IMT a ET_{oPM} ficou em posição intermediária aos valores estimados (FIGURA 2.7). Em relação ao modelo Penman-Monteith ASCE, houve tendência dos métodos alternativos superestimarem a ET_o apenas nas estações do INMET, e subestimarem nas estações do IAPAR e SIMEPAR. A tendência

observada pode estar relacionada com a periodicidade (horária e diária) dos dados utilizados nos cálculos da ET_o , bem como com a forma de leitura e manutenção dos sensores nas estações do IAPAR, INMET e SIMEPAR. Os dados climáticos das estações do INMET foram fornecidos em periodicidade horária, e as leituras disponíveis foram convertidas posteriormente fazendo-se a média em 24 h para cada variável. Os dados de temperatura e umidade relativa média das estações convencionais do IAPAR são obtidos com a média diária compensada:

$$\text{Média} = (\text{leitura mínima} + \text{leitura máxima} + \text{leitura das 9:00 h} + 2 \cdot \text{leitura das 21 h}) / 5$$

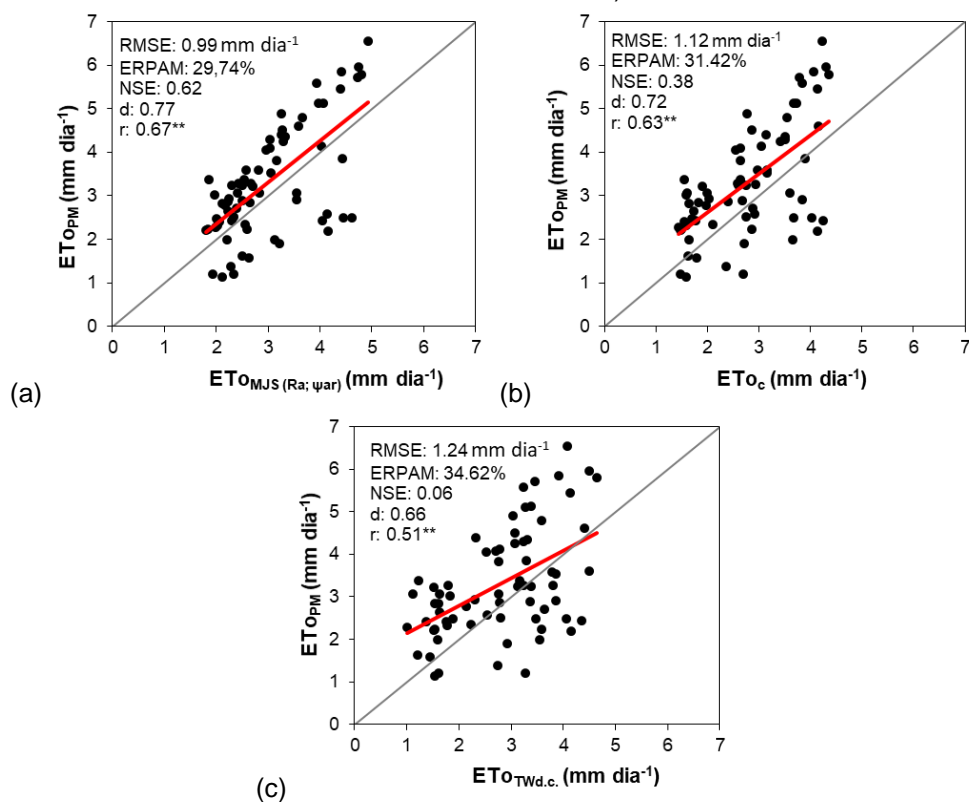
No SIMEPAR as leituras são feitas a cada 15 minutos nas estações automáticas, e a média diária resulta das 96 leituras ao longo do dia. Nas estações do INMET, em que os dados utilizados têm leituras na periodicidade horária, teve-se valores médios de $ET_{o_{PM}} = 2,39 \text{ mm dia}^{-1}$, e nas estações IAPAR e SIMEPAR teve-se valores médios de $ET_{o_{PM}} = 3,38 \text{ mm dia}^{-1}$.

Lopes e Leal (2016) na região de Petrolina-Juazeiro (Semiárido Nordeste), também verificaram diferenças entre valores de $ET_{o_{PM}}$ estimada com dados provenientes de periodicidade diária e horaria, variando entre 0,10 e 38%. Conforme os autores, as diferenças estão relacionadas a fatores como amplitude térmica, alteração da velocidade de vento e incidência de radiação solar em curtos períodos de tempo. Djaman et al. (2017), na região de Senegal, África Ocidental, também observaram superestimativa da $ET_{o_{PM}}$ diária em relação a horaria entre 1,3 e 8%, dependendo dos locais estudados. Logo, pode-se considerar que a variação de 30% verificada entre as estimativas da $ET_{o_{PM}}$ entre as estações do INMET e "IAPAR e SIMEPAR" se devem à diferença de periodicidade de leitura das variáveis de entrada (medidas nas estações meteorológicas), que servem para o cálculo da $ET_{o_{PM}}$.

Dentre os modelos alternativos testados a $ET_{o_{TW.dc}}$ foi a que menos acompanhou a tendência da $ET_{o_{PM}}$ ($r = 0,51$; FIGURA 2.8c), apresentando maior dispersão na associação linear. O resultado pode estar relacionado ao método, que realiza a estimativa da evapotranspiração para um período mensal, sendo necessária uma correção para obter o valor diário (Cunha et al., 2017). Gurski et al. (2018), no Estado do Paraná, também constataram baixo desempenho do modelo de Thornthwaite. Como o modelo se baseia apenas na temperatura do ar, os

melhores ajustes foram observados para climas quentes e secos do Estado. Cunha et al. (2017) também obteve resultados inferiores com o modelo de Thornthwaite na região do Mato Grosso do Sul ($r = 0,49$).

FIGURA 2.8 – ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR, ERROS, ÍNDICE E COEFICIENTE OBTIDOS ENTRE A EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA CALCULADA COM O MODELO DE PENMAN-MONTEITH ASCE (ET_{oPM}), UTILIZANDO DADOS MEDIDO EM ESTAÇÕES, E AS EVAPOTRANSPIRAÇÕES CALCULADAS COM MODELOS ALTERNATIVOS, UTILIZANDO DADOS ESTIMADOS POR SENSORIAMENTO REMOTO, SENDO: a) “ ET_{oPM} vs. $ET_{oMJS}(\psi_{ar};Ra)$ ” (MORETTI-JERSZURKI-SILVA); b) “ ET_{oPM} vs. ET_{oc} ” (CAMARGO); c) “ ET_{oPM} vs. $ET_{oTWd.c.}$ ” (THORNTHWAITE DIÁRIO CORRIGIDO).



FONTE: O Autor (2020)

O modelo de Camargo seguiu a tendência da ET_{oPM} com menos observações divergentes (NFT-IMT em setembro/2016 e março/2017; VTN-IMT em abril/2016), em relação ao modelo de Thornthwaite. A correlação linear também foi mais estreita ($r = 0,63$; FIGURA 2.8b). A análise temporal da série de evapotranspiração calculada indicou que a ET_{oc} e $ET_{oTWd.c.}$ tiveram valores bem próximos, porém com algumas divergências (LDA-IPR em janeiro/2016; NFT-IMT em janeiro e abril/2016; VTN-IMT, FPO-SIM, PGA-SIM, TBA-SIM em abril/2016 e 2018). Melo et al. (2012) obteve $r = 0,80$ com o método de Camargo, sendo um dos modelos com melhor

desempenho, comparado à outros modelos (Hargreaves-Samani, Thornthwaite, Priestley-Taylor, Makkink e outros) analisados na região de Uberaba, Estado de Minas Gerais. Os autores consideraram que o bom desempenho deveu-se à temperatura do ar e radiação solar, representando a energia disponível para a evapotranspiração em termos de fluxo de calor latente (Yan et al., 2012).

A $ET_{O_{MJS}(Ra; \psi_{ar})}$ é estimada com um modelo físico que associa o efeito combinado das variáveis temperatura e umidade relativa para o cálculo do potencial hídrico atmosférico, e considera a radiação solar no topo da atmosfera. Após ser calibrado, Jerszurki et al. (2017) encontraram estreita associação entre “ $ET_{O_{MJS}(Ra; \psi_{ar})}$ vs $ET_{O_{PM}}$ ”, obtendo $0,84 \leq r \leq 0,89$ em clima subtropical úmido no Brasil. Porém, melhores resultados foram obtidos para climas secos e quentes. Com a calibração do modelo MJS na BHRT, obteve-se coeficientes $a = -0,0888$ e $b = 0,3683$, e valores de $\psi_{ar.min} = 28,5$ MPa e $\psi_{ar.max} = 156,0$ MPa. No presente estudo, o modelo MJS apresentou poucos pontos divergentes em relação à tendência com a $ET_{O_{PM}}$ (LDA-IPR em março/2017; NFT-IMT em janeiro/2016 e março/2017). A tendência semelhante entre o modelo alternativo e o padrão obteve associação linear satisfatória ($r = 0,67$; FIGURA 2.8a), considerando que a BHRT predomina climas úmidos. O $NSE = 0,62$ evidenciou que modelo MJS teve melhor desempenho em relação aos outros modelos alternativos de evapotranspiração testados.

O modelo de Thornthwaite foi o que teve pior desempenho (FIGURA 2.8c). Os modelos Camargo (FIGURA 2.8b) e Moretti-Jerszurki-Silva (FIGURA 2.8a) obtiveram melhor desempenho, apresentando $RMSE$ de 1,12 e 0,99 mm dia⁻¹ em relação aos métodos Penman-Monteith, respectivamente. Embora o desempenho dos modelos MJS e Camargo tenham sido similares, o Moretti-Jerszurki-Silva foi um pouco superior. A média da evapotranspiração para $ET_{O_{PM}}$, ET_{O_C} , $ET_{O_{TW.dc}}$ e $ET_{O_{MJS}(\psi_{ar}; Ra)}$ foi de 3,3; 2,8; 2,8 e 3,0 mm dia⁻¹, respectivamente.

2.6 CONCLUSÕES

– As variáveis espaciais T_s e W_p provenientes de imagens de satélite (Landsat 8 e Aqua MODIS), após serem calibradas com dados climáticos locais em modelos lineares simples ou múltiplos, podem estimar adequadamente a média diária da

temperatura ($T_{m_{EM}}$) e umidade relativa ($UR_{m_{EM}}$) do ar, medidos em estações meteorológicas.

– Os modelos lineares múltiplos testados, constituindo-se em regressão geral considerando todas as estações meteorológica juntas, apresentaram desempenho satisfatório estatisticamente (significativo) para estimar a temperatura ($T_{e_{SR}(Wp;Ts)}$; $r = 0,87$) e umidade relativa ($UR_{e_{SR}(Wp;Ts)}$; $r = 0,41$).

– O modelo Moretti-Jerszurki-Silva ($ET_{O_{MJS}(Ra; \psi_{ar})}$) apresentou desempenho satisfatório estatisticamente para estimar a evapotranspiração de referência, de forma equivalente ao método de Penman-Monteith ASCE, utilizando dados estimados com sensoriamento remoto.

REFERÊNCIAS

AHMADI, S. H.; JAVANBAKHT, Z. Assessing the physical and empirical reference evapotranspiration (ET_o) models and time series analyses of the influencing weather variables on ET_o in a semi-arid area. **Journal of Environmental Management**, [S.L.], v. 276, p. 111278, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111278>.

ALLEN, R. G. **REF-ET, Reference Evapotranspiration Calculator Version Windows 2.0**. Univ. of Idaho Res. and Ext. Center, Kimberly, ID, 82 p. 2000.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. 56. ed. U.S.A: Fao Irrigation and Drainage Paper, 1998. 327 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**, [S.L.], v. 133, n. 4, p. 380-394, ago. 2007. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2007)133:4(380)).

ALLEN, R.; IRMAK, A.; TREZZA, R.; HENDRICKX, J. M. H.; BASTIAANSEN, W.; KJAERGAARD, J. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. **Hydrological Processes**, [S.L.], v. 25, n. 26, p. 4011-4027, 22 dez. 2011. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.8408>.

ALTHOFF, D.; ALVINO, F. C. G.; FILGUEIRAS, R.; ALEMAN, C. C.; CUNHA, F. F. Evapotranspiration for irrigated agriculture using orbital satellites. **Bioscience Journal**, [S.L.], p. 670-678, 2019. EDUFU - Editora da Universidade Federal de Uberlândia. <http://dx.doi.org/10.14393/bj-v35n3a2019-41737>.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [S.L.], v. 22, n. 6, p. 711-728, 1 dez. 2013. Schweizerbart. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

ANA (Agência Nacional de Águas). **Estimativas de evapotranspiração real por sensoriamento remoto no Brasil**. Brasília - Df: Ana, 2020. 23 p. CDU 556.13:528.8(81).

ANDERSON, M. C.; ALLEN, R. G.; MORSE, A.; KUSTAS, W. P. Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 122, p. 50-65, jul. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.025>.

ANDERSON, M. C.; ZOLIN, C. A.; SENTELHAS, P. C.; HAIN, C. R.; SEMMENS, K.; YILMAZ, M. T.; GAO, F.; OTKIN, J. A.; TETRAULT, R. The Evaporative Stress Index as an indicator of agricultural drought in Brazil: an assessment based on crop yield impacts. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 174, p. 82-99, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.034>.

ASCE-EWRI (New York). American Society of Civil Engineers. **The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation**. New York: American Society of Civil Engineers, 2005. 70 p. Task Committee Report.

BASTIAANSEN, W. G. M.; ALI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.L.], v. 94, n. 3, p. 321-340, mar. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0167-8809\(02\)00034-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0167-8809(02)00034-8).

CAMARGO, A. P. **Balço hídrico no Estado de São Paulo**. 3.ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1971. 24p. (Boletim,116)

CHOUDHURY, I.; BHATTACHARYA, B. An assessment of satellite-based agricultural water productivity over the Indian region. **International Journal of Remote Sensing**, [S.L.], v. 39, n. 8, p. 2294-2311, 9 jan. 2018. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2017.1421792>.

CUNHA, F. F.; MAGALHÃES, F. F.; CASTRO, M. A.; SOUZA, E. J. Performance of estimative models for daily reference evapotranspiration in the city of Cassilândia, Brazil. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 37, n. 1, p. 173-184, fev. 2017. FapUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v37n1p173-184/2017>.

D'ANGELO, J. V. H. **Manual para utilização do Sistema Internacional de Unidades** [S.L.]. 2004. Disponível em: <https://www.feq.unicamp.br/images/stories/documentos/eq481_manual_si.pdf>. Acesso em: 10 set. 2019.

DJAMAN, K.; IRMAK, S.; SALL, M.; SOW, A.; KABENGE, I. Comparison of sum-of-hourly and daily time step tandardized ASCE Penman-Monteith reference evapotranspiration. **Theoretical and Applied Climatology**, [S.L.], v. 134, n. 1-2, p. 533-543, 13 out. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-017-2291-6>.

EARTHEXPLORER. United States Geological Survey (USGS). **Imagem Landsat 8**. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 25 maio 2020.

FAN, Z.; THOMAS, A. Decadal changes of reference crop evapotranspiration attribution: spatial and temporal variability over china 1960-2011. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 560, p. 461-470, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.080>.

FGV (Fundação Getúlio Vargas). **Estudo sobre eficiência do uso da água no Brasil: análise do impacto da irrigação na agricultura brasileira e potencial de produção de alimentos face ao aquecimento global**. Rio de Janeiro - Rj: Gv Agro Centro de Estudos do Agronegócio, 2016. 17 p. <Http://gvagro.fgv.br/pesquisa>.

FILGUEIRAS, R.; MANTOVANI, E. C.; ALTHOFF, D.; DIAS, S. H. B.; CUNHA, F. F.; VENANCIO, L. P. a. Productivity and water demand of maize estimated by the modified satellite Priestley-Taylor algorithm. **Semina: Ciências Agrárias**, [S.L.], v. 40, n. 62, p. 2991, 30 set. 2019a. Universidade Estadual de Londrina. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n6supl2p2991>.

FILGUEIRAS, R.; MANTOVANI, E. C.; ALTHOFF, D.; DIAS, S. H. B.; CUNHA, F. F. b. Sensitivity of evapotranspiration estimated by orbital images under influence of surface temperature. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 39, n. , p. 23-32, set. 2019b. FapUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v39nep23-32/2019>.

GAO, B., et al., 2015. MODIS Atmosphere L2 Water Vapor Product. NASA MODIS Adaptive Processing System, Goddard Space Flight Center, USA: DOI http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MYD05_L2.006 (Aqua)

GHOLAMNIA, M.; BOLOORANI, A. D.; HAMZEH, S.; KIAVARZ, M. Diurnal Air Temperature Modeling Based on the Land Surface Temperature. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 9, n. 9, p. 915, 1 set. 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs9090915>.

GUO, B.; YANG, F.; WU, H.; ZHANG, R.; ZANG, W.; WEI, C.; JIANG, G.; MENG, C.; ZHAO, H.; ZHEN, X. How the variations of terrain factors affect the optimal interpolation methods for multiple types of climatic elements? **Earth Science Informatics**, [S.L.], v. 14, n. 2, p. 1021-1032, 23 mar. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12145-021-00609-2>.

GURSKI, B. C.; JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M. de. Alternative reference evapotranspiration methods for the main climate types of the state of Paraná, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 53, n. 9, p. 1003-1010, set. 2018. FapUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2018000900003>.

IAT (Instituto Água e Terra). Bacia hidrográfica do Rio Tibagi: módulo 1 – diagnóstico e módulo 2 – iniciativas em andamento na bacia. Governo do Estado do Paraná. 2009.

IAT (Instituto Água e Terra). Plano de bacia do rio Tibagi: Precipitação média anual. Vol. 1. Governo do estado do Paraná. 2009. Disponível em: <<http://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Comite-da-Bacia-do-Rio-Tibagi>>.

INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). **Normais Climatológicas do Brasil**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso em: 27 maio 2020.

INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia). Bureau International Des Poids Et Mesures (BIPM). **O Sistema Internacional de Unidades**. Rio de Janeiro, 2014. 16 p. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/sistema_internacional_de_unidades_suplementohttp://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/sistema_internacional_de_unidades_suplemento_2014-2016-Jan.pdf_2014-2016-Jan.pdf>. Acesso em: 05 set. 2019.

JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M.; SILVA, L. C. R. Expanding the geography of evapotranspiration: An improved method to quantify land-to-air water fluxes in tropical and subtropical regions. **PLOS ONE**, v. 12, n. 6, p. 1-1, 2017. Disponível <<http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/publicacoes.htm>>. Acesso em: 1 set. 2019.

JI, D.; SHI, J.; XIONG, C.; WANG, T.; ZHANG, Y. A total precipitable water retrieval method over land using the combination of passive microwave and optical remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 191, p. 313-327, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.01.028>.

JING, W.; YASEEN, Z. M.; SHAHID, S.; SAGGI, M. K.; TAO, H.; KISI, O.; SALIH, S. Q.; AL-ANSARI, N.; CHAU, K. Implementation of evolutionary computing models for reference evapotranspiration modeling: short review, assessment and possible future research directions. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 811-823, 1 jan. 2019. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/19942060.2019.1645045>.

KARIMI, P.; BASTIAANSEN, W. G. M.; MOLDEN, D.; CHEEMA, M. J. M. Basin-wide water accounting based on remote sensing data: an application for the indus basin. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S.L.], v. 17, n. 7, p. 2473-2486, 4 jul. 2013. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-17-2473-2013>.

KLOOG, I.; CHUDNOVSKY, A.; KOUTRAKIS, P.; SCHWARTZ, J. Temporal and spatial assessments of minimum air temperature using satellite surface temperature measurements in Massachusetts, USA. **Science of the Total Environment**, [S.L.], v. 432, p. 85-92, ago. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.05.095>.

LI, L.; ZHA, Y. Mapping relative humidity, average and extreme temperature in hot summer over China. **Science of the Total Environment**, [S.L.], v. 615, p. 875-881, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.022>.

LIU, S.; ZHA, Y.; ZHANG, J.; GAO, J.; ZHANG, Q. Detection of haze and its intensity based on visibility and relative humidity estimated from MODIS data. **International Journal of Remote Sensing**, [S.L.], v. 38, n. 23, p. 7085-7100, 31 ago. 2017. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2017.1371866>.

LOPES, I.; LEAL, B. G. Evapotranspiração horária x diária utilizando penmanmonteith para o polo de desenvolvimento Petrolina-PE/Juazeiro-BA. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, [S.L.], v. 10, n. 5, p. 914-924, 31 out. 2016. INOVAGRI. <http://dx.doi.org/10.7127/rbai.v10n500465>.

LU, E.; TAKLE, E. S. Spatial variabilities and their relationships of the trends of temperature, water vapor, and precipitation in the North American Regional Reanalysis. **Journal of Geophysical Research**, [S.L.], v. 115, n. 6, p. 1-11, 30 mar. 2010. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2009jd013192>.

LUENENBERG, Z. A. V.; NETO, P. H. W.; GARBUIO, P. W.; DELALIBERA, H. C. Consumption and application cost of irrigation water. **Ambiência**, Guarapuava, Pr, v. 5, n. 2, p. 293-300, jun. 2009. Maio/Ago. ISSN 1808 - 0251.

MA, Z.; YAN, N.; WU, B.; STEIN, A.; ZHU, W.; ZENG, H. Variation in actual evapotranspiration following changes in climate and vegetation cover during an ecological restoration period (2000–2015) in the Loess Plateau, China. **Science of the Total Environment**, [S.L.], v. 689, p. 534-545, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.155>.

MAČEK, Urška; BEZAK, Nejc; IRAJ, Mojca. Reference evapotranspiration changes in Slovenia, Europe. **Agricultural and Forest Meteorology**, [S.L.], v. 260-261, p. 183-192, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.06.014>.

MEDRI, M. E.; BIANCHINI, E; SHIBATTA, O. A.; PIMENTA, J. A. **A Bacia do Rio Tibagi**. Londrina -Pr: Câmara Brasileira do Livro, 2002. 602 p. ISBN 85-902390-1-2 / 85-902392-1-7 / 85-902394-1-1 / 85-902395-1-9.

MELO, G. de; FERNANDES, A. L. T. Evaluation of empirical methods to estimate reference evapotranspiration in Uberaba, State of Minas Gerais, Brazil. **Revista da Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.32, n.5, p.875-888, 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v32n5/07.pdf>>.

NOURI, H.; FARAMARZI, M.; SOBHANI, B.; SADEGHI, S. H. Estimation of evapotranspiration based on surface energy balance algorithm for land (SEBAL) using LANDSAT 8 and modis images. **Applied Ecology and Environmental Research**, [S.L.], v. 15, n. 4, p. 1971-1982, 2017. Applied Ecology and Environmental Research. http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1504_19711982.

PACA, V. H. M.; ESPINOZA-DÁVALOS, G. E.; HESSELS, T. M.; MOREIRA, D. M.; COMAIR, G. F.; BASTIAANSEN, W. G. M. The spatial variability of actual evapotranspiration across the Amazon River Basin based on remote sensing products validated with flux towers. **Ecological Processes**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 1-20, 15 fev. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1186/s13717-019-0158-8>.

PELTA, R.; CHUDNOVSKY, A. A. Spatiotemporal estimation of air temperature patterns at the street level using high resolution satellite imagery. **Science of the Total Environment**, [S.L.], v. 579, p. 675-684, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.042>.

RAMÍREZ-CUESTA, J.M.; ALLEN, R.G.; INTRIGLIOLO, D.S.; KILIC, A.; ROBISON, C.W.; TREZZA, R.; SANTOS, C.; LORITE, I.J. METRIC-GIS: an advanced energy balance model for computing crop evapotranspiration in a gis environment. **Environmental Modelling & Software**, [S.L.], v. 131, p. 104770, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104770>.

REES, S.W.; ADJALI, M.H.; ZHOU, Z.; DAVIES, M.; THOMAS, H.R. Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 4, n. 3, p. 213-265, set. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1364-0321\(99\)00018-0](http://dx.doi.org/10.1016/s1364-0321(99)00018-0).

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**, [S.L.], v. 185, p. 171-185, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.043>.

SENAY, G. B.; SCHAUER, M.; VELPURI, N. M.; SINGH, R. K.; KAGONE, S.; FRIEDRICHS, M.; LITVAK, M. E.; DOUGLAS-MANKIN, K. R. Long-Term (1986–2015) Crop Water Use Characterization over the Upper Rio Grande Basin of United States and Mexico Using Landsat-Based Evapotranspiration. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 11, n. 13, p. 1587, 4 jul. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs11131587>.

SHABBIR, A.; ARSHAD, M.; BAKHSH, A.; USMAN, M.; SHAKOOR, A.; AHMAD, I.; AHMAD, A. Apparent and real water productivity for cotton-wheat zone of punjab, Pakistan. **Pakistan Journal of Agricultural Sciences**, Faisalabad, Paquistão, v. 49, n. 3, p. 357-363, abr. 2012. Bimestral. ISSN (Online) 2076-0906.

SHI, F.; ZHAO, C.; ZHOU, X.; LI, X. Spatial Variations of Climate-Driven Trends of Water Vapor Pressure and Relative Humidity in Northwest China. **Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences**, [S.L.], v. 55, n. 2, p. 221-231, 15 out. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13143-018-0062-7>.

SINGH, R.; SENAY, G. Comparison of Four Different Energy Balance Models for Estimating Evapotranspiration in the Midwestern United States. **Water**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 9, 26 dez. 2015. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w8010009>.

SOUZA, J. L. M. **Fundamentos de matemática e estatística para formulação de modelos e análise de dados: aplicado às ciências agrárias**. Curitiba, Plataforma Moretti/DSEA/SCA/UFPR, 2018. (Manual didático)

THORNTHWAITE, C. W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. **Geographical Review**, [S.L.], v. 38, n. 1, p. 55-94, jan. 1948. <Http://www.jstor.org/stable/210739>.

USGS (South Dakota). National Aeronautics and Space Administration (NASA). **Landsat 8 (L8) Data Users Handbook**. 4. ed. Sioux Falls: U.S. Geological Survey (usgs), 2019. 115 p. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-8-data-users-handbook>>. Acesso em: 02 set. 2019.

VENANCIO, L. P.; EUGENIO, F. C.; FILGUEIRAS, R.; CUNHA, F. F.; SANTOS, R. A.; RIBEIRO, W. R.; MANTOVANI, E. C. Mapping within-field variability of soybean evapotranspiration and crop coefficient using the Earth Engine Evaporation Flux (EEFlux) application. **PLOS ONE**, [S.L.], v. 15, n. 7, p. 1-20, 9 jul. 2020. Public Library of Science (PLOS). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0235620>.

WAGLE, P.; BHATTARAI, N.; GOWDA, P. H.; KAKANI, V. G. Performance of five surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in high biomass sorghum. **Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [S.L.], v. 128, p. 192-203, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.03.022>.

WANG, D.; YU, T.; LIU, Y.; GU, X.; MI, X.; SHI, S.; MA, M.; CHEN, X.; ZHANG, Y.; LIU, Q. Estimating Daily Actual Evapotranspiration at a Landsat-Like Scale Utilizing Simulated and Remote Sensing Surface Temperature. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 13, n. 2, p. 225, 11 jan. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs13020225>.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the Evaluation and Comparison of Models. **Journal of Geophysical Research**, [s.l.], v. 90, n. 5, p.8995-9005, 20 set. 1985. Paper number 5C0173. 0148-0227/85/005C-0173505.00.

YAN, H.; WANG, S.Q.; BILLESBACH, D.; OECHEL, W.; ZHANG, J.H.; MEYERS, T.; MARTIN, T.A.; MATAMALA, R.; BALDOCCHI, D.; BOHRER, G. Global estimation of evapotranspiration using a leaf area index-based surface energy and water balance model. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 124, p. 581-595, set. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.06.004>.

ZIMMERMANN, C. M.; GUIMARÃES, O.; PERALTA-ZAMORA, P. G. Avaliação da qualidade do corpo hídrico do rio tibagi na região de ponta grossa utilizando análise de componentes principais (pca). **Química Nova**, [S.L.], v. 31, n. 7, p. 1727-1732, jan. 2008.

3 CAPÍTULO III – VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ESTIMADA COM IMAGENS DE SATÉLITES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TIBAGI, ESTADO DO PARANÁ, BRASIL

3.1 RESUMO

Teve-se por objetivo no presente estudo avaliar a variabilidade espacial da evapotranspiração de referência diária (ET_o) na bacia hidrográfica do rio Tibagi (BHRT), estimada com dados remotos em anos com ocorrência de eventos ENOS (*El Niño*, *La Niña* e Normalidade climática); bem como estimar a ET_o da bacia no intervalo entre imagens do satélite Landsat, utilizando um algoritmo interpolador temporal. A ET_o foi estimada com modelo Moretti-Jerszurki-Silva (MJS; $ET_{oMJS(\psi_{ar};Ra)}$), que considera o potencial hídrico atmosférico (ψ_{ar}) e radiação solar no topo da atmosfera (Ra), tendo como entrada variáveis espacializadas (temperatura e umidade relativa do ar), estimadas com modelo de regressão linear múltiplo na BHRT. A variabilidade espacial da bacia foi avaliada com imagens representando as estações do verão, outono, inverno e primavera, em cenários classificados com Índice de *Niño* Oceânico (ONI), considerando os anos: 2013 (Normal), 2015 (*El Niño*) e 2011 (*La Niña*). A variabilidade temporal da $ET_{oMJS(\psi_{ar};Ra)}$ foi testada com interpolação linear no período entre imagens do satélite Landsat 8 (análise no ano de 2013), com algoritmo interpolador temporal “*r.series.interp*” disponível no software Qgis 3.10. A validação da evapotranspiração estimada com o modelo MJS, interpolado temporalmente entre imagens de satélite ($ET_{oMJS(\psi_{ar};Ra)_{int}}$), foi comparado com o método padrão Penman-Monteith ASCE (ET_{oPM}). Foram avaliados todos os dias com dados disponíveis no ano de 2013, para duas estações meteorológicas (IAPAR em Londrina e INMET em Ponta Grossa). As associações entre ET_{oPM} (estimada com dados de estações meteorológicas) e $ET_{oMJS(\psi_{ar};Ra)_{int}}$ foram avaliadas com índices, erros e coeficientes: NSE , d , $RMSE$, $ERPAM_{\%}$ e r . A evapotranspiração espacializada permitiu identificar diferenças na mesma estação do ano nos cenários climáticos analisados (*La Niña*, Normal e *El Niño*), o que não foi possível com a ET_{oPM} . A metodologia desenvolvida para estimar a $ET_{oMJS(\psi_{ar};Ra)}$ espacializada em grandes áreas tem precisão estatística aceitável, mas o processo para constituir o mosaico final para área de grande cobertura, como na BHRT, ainda mostrou-se bem laborioso. A estimativa temporal da evapotranspiração tem precisão estatística satisfatória. O número de imagens viáveis e o algoritmo interpolador linear limitou o acompanhamento das variações da ET_{oPM} diária ao longo do tempo.

Palavras-chave: Mapeamento, modelagem, cenários climáticos, cobertura do solo.

3.2 ABSTRACT

The goal of this study was to evaluate the spatial variability of daily reference evapotranspiration (ET_o) in the Tibagi River Basin (TRB), estimated with remote data in years with the occurrence of ENSO events (*El Niño*, *La Niña* and Climatic Normality); as well as estimating the ET_o of the basin in the interval between images from the Landsat satellite, using a temporal interpolation algorithm. The ET_o was estimated with the Moretti-Jerszurki-Silva model (MJS; $ET_{o_{MJS(\psi_{ar};Ra)}}$), which considers the atmospheric water potential (ψ_{ar}) and solar radiation at the top of the atmosphere (Ra), having as input spatial variables (temperature and relative humidity of the air) estimated with multiple linear regression model in the Tibagi River Basin (TRB). The spatial variability of the basin was evaluated with representative images such as summer, autumn, winter and spring seasons, in scenarios classified with the Oceanic Niño Index (ONI), considering the years: 2013 (Normal), 2015 (*El Niño*) and 2011 (*La Niña*). The temporal variability of $ET_{o_{MJS(\psi_{ar};Ra)}}$ was tested with linear interpolation in the period between images from the Landsat 8 satellite (analysis in 2013), with the temporal interpolation algorithm “*r.series.interp*” available in the Qgis software 3.10. Validation of estimated evapotranspiration with the MJS model, temporally interpolated between satellite images ($ET_{o_{MJS(\psi_{ar};Ra)_{int}}}$) was compared with the standard Penman-Monteith ASCE ($ET_{o_{PM}}$) method. They were evaluated every day with data available in 2013, for two weather stations (Londrina from IAPAR and Ponta Grossa from INMET). Associations between $ET_{o_{PM}}$ (estimated with data from meteorological stations) and $ET_{o_{MJS(\psi_{ar};Ra)_{int}}}$ were evaluated with indices, errors and coefficients: NSE , d , $RMSE$, $ERPAM_{\%}$ and r . The spatialized evapotranspiration allowed the identification of differences in the same season of the year in the analyzed climate scenarios (*El Niño*, *La Niña* and Normal), which was not possible with the $ET_{o_{PM}}$. The methodology developed to estimate the $ET_{o_{MJS(\psi_{ar};Ra)}}$ spatialized in large areas has acceptable statistical precision, but the process to constitute the final mosaic for a large coverage area, as in the TRB, still proved to be very laborious. The temporal estimate of evapotranspiration has satisfactory statistical precision. The number of viable images and the linear interpolation algorithm limited the monitoring of daily $ET_{o_{PM}}$ variations over time.

Keywords: Mapping, modeling, climate scenarios, land cover.

3.3 INTRODUÇÃO

A literatura é muito rica em estudos envolvendo a determinação da evapotranspiração (*ET*) com métodos tradicionais (medidas pontuais), como evapotranspirômetros ou lisímetros (Bakhtiari et al., 2006; Benli et al., 2006; Tyagi et al., 2000), e estimativas com equações físicas como Penamn-Monteith (ASCE-EWRI, 2005) ou empíricas (Chiew et al., 1995; Alexandris e Kerkides, 2003; Allen et al., 2006; López-Urrea et al., 2006; Shah e Edling, 2000; Syperreck et al., 2008; Moura et al., 2010; Santos, 2020). Porém, o monitoramento da *ET* em larga escala não é viável com os métodos tradicionais, devido ao custo e logística, bem como a necessidade de informações climáticas locais (em quantidade e qualidade). Uma alternativa para o problema consiste em utilizar dados obtidos remotamente para modelagem da *ET* (Herman et al, 2018). O uso do sensoriamento remoto para o estimava da evapotranspiração de determinada região ou bacia hidrográfica ainda é recente e precisa ser melhor estudado como foi feito pelos autores Glenn et al. (2010), Gibson et al. (2013) e Talsma et al. (2018).

A existência de dados das variáveis climáticas nas periodicidades desejadas (em quantidade e qualidade) é fundamental para análises envolvendo a estimativa da evapotranspiração (referência, cultura ou real). No entanto, os dados climáticos são medidos em estações meteorológicas, que podem não estar disponíveis em certos locais onde se deseja fazer a estimativa da evapotranspiração (Jing et al., 2019). A *ET* também apresenta grande variabilidade espacial, pois está sujeita a condições e variações ambientais (Althoff et al., 2019). Logo, medidas pontuais da *ET*, determinadas com métodos convencionais (sensores de água no solo, evapotranspirômetros ou lisímetros, estações meteorológicas, entre outros) podem não representar as medidas no espaço ao seu redor, limitando a obtenção da variabilidade dos dados de evapotranspiração. O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), por exemplo, tem 25 estações meteorológicas no estado do Paraná, contendo extensão territorial 199280 km². Logo, cada estação representaria aproximadamente a extensão de 8000 km² com único valor de evapotranspiração.

Além da importância espacial da *ET*, estudos considerando o efeito do fenômeno *El Niño* Oscilação Sul (ENOS) também são interessantes, visto que projeções indicam que eventos ENOS tendem a ocorrer com maior frequência e intensidade nos próximos anos (Cavalcante et al., 2015). Cunha et al. (2011)

consideram que a precipitação pluvial é a variável mais afetada durante o fenômeno ENOS, ocorrendo excesso de chuvas durante o *El Niño* e estiagem em ano de *La Niña*, na região sul do Brasil. Entretanto, no nordeste e norte brasileiro, observou-se aspectos diferentes, como decréscimo na média de chuvas no *El Niño* e período mais chuvoso geralmente na *La Niña* (Cunha et al., 2011; Delgado et al. 2017).

Embora as fases extremas de Oscilação Sul (*El Niño* e *La Niña*) influenciem principalmente a disponibilidade de água, a evapotranspiração é uma componente essencial para a realização de balanços hídricos, que por sua vez são fundamentais para planejamento e gestão dos recursos hídricos (Ma et al., 2019), principalmente em escala de bacias hidrográficas (Karimi et al., 2013). Desta forma, a obtenção da evapotranspiração por meio de sensoriamento remoto poderá contribuir muito com estudos em escala regional a global, fornecendo estimativas espacializadas e com baixo custo (Delgado et al., 2017).

As imagens Landsat possuem resolução alta (30 m). Porém, possuem intervalo de tempo de captura entre imagens de 16 dias, o que pode ser um problema para acompanhar o monitoramento diário do crescimento e desenvolvimento de culturas agrícolas, dependendo de pouca ou nenhuma cobertura de nuvens (Gao et al., 2006; Roy et al., 2014). O monitoramento contínuo (diário) da evapotranspiração com alta resolução espacial é fundamental para compreender a dinâmica da *ET*. Estimativas da *ET* com alta resolução espacial e temporal podem fornecer informações importantes sobre eficiência hídrica das culturas e umidade do solo, dando subsídio para otimizar o uso da água na irrigação (Cammalleri et al., 2013).

O sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) possui resolução espacial moderada (250, 500 e 1000 metros) e resolução temporal diária. Ke et al. (2017) consideram que a resolução espacial do sensor limita muito sua utilização em escala local ou de bacia hidrográfica, para finalidades irrigacionistas ou gestão de recursos hídricos. Desta forma, para monitoramento, o ideal seria a produção de mapas contínuos e de alta resolução espacial da *ET*. No entanto, os satélites de sensoriamento remoto disponíveis atualmente não conseguem fornecer imagens com alta resolução espacial e temporal em apenas uma plataforma, devido ao equilíbrio que deve ter entre as resoluções (Emelyanova et al., 2013; Wang et al., 2019; Bai et al., 2020).

Com a finalidade de unir as resoluções “espacial moderadamente alta do satélite Landsat” e “diária do sensor MODIS”, Gao et al. (2006) desenvolveu um algoritmo que realiza a fusão da refletância adaptativa espacial e temporal (STARFM), para combinar a refletância de superfície Landsat e MODIS. Zhu et al. (2010) aprimorou esse algoritmo, criando o ESTARFM. Os dois algoritmos são avançados e complexos para serem executados, mas são muito utilizados para melhorar a resolução espacial do Landsat em diferentes estudos (Roy et al., 2014; Yang et al., 2016; Ke et al., 2017; Heimhuber et al., 2018; Filgueiras et al., 2020). Entretanto, acredita-se que algoritmos simplificados possam facilitar o acesso gratuito ao conjunto de dados com alta resolução espacial e temporal, auxiliando o desenvolvimento de atividades técnicas e estudos científicos. Emelyanova et al. (2013) relatam que nem sempre algoritmos mais complexos resultam em menores erros em relação aos algoritmos mais simples.

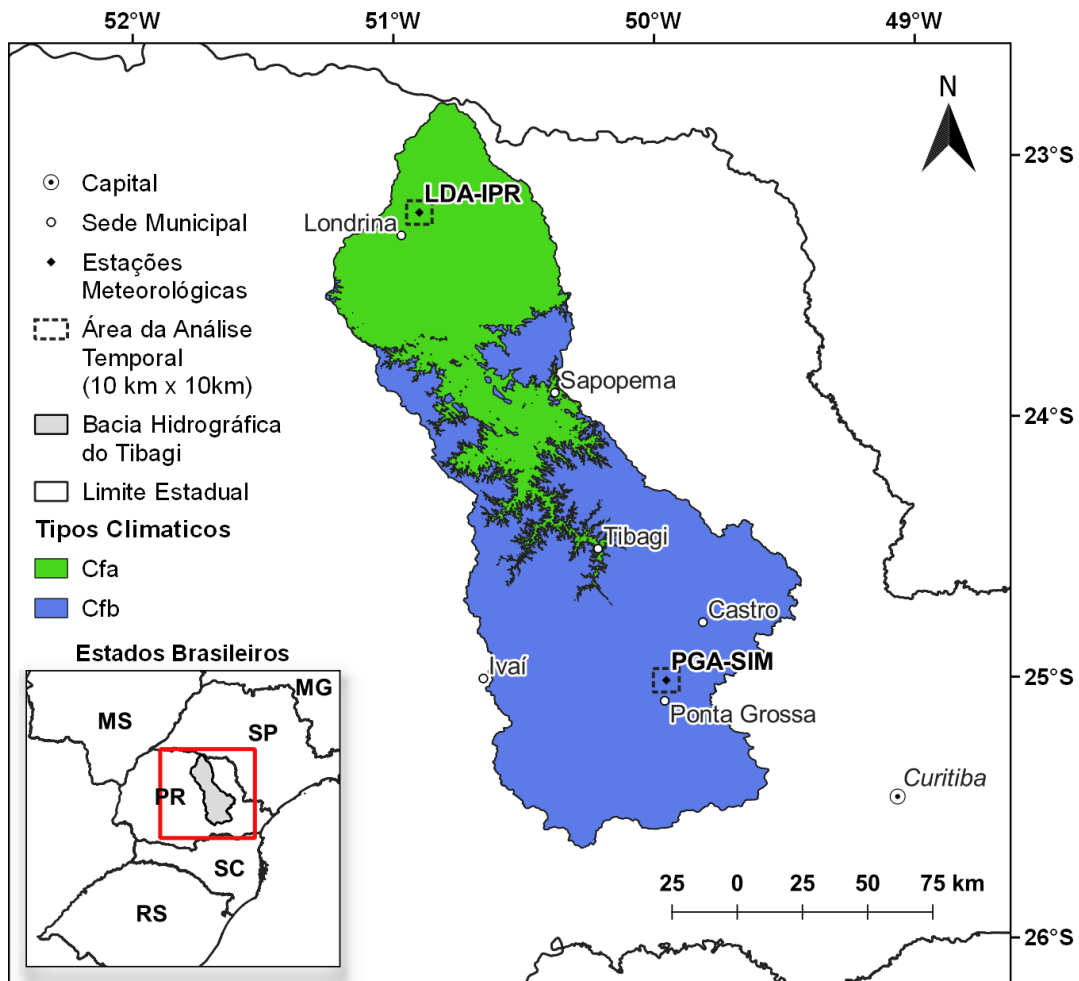
Teve-se por objetivo no presente estudo avaliar a variabilidade espacial da evapotranspiração de referência diária (ET_o) na BHRT, estimada com dados remotos em anos com ocorrência de eventos ENOS (*El Niño*, *La Niña* e Normalidade climática); bem como estimar a ET_o da bacia no intervalo entre imagens do satélite Landsat, utilizando um algoritmo interpolador temporal.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 Descrição da área de estudo

A área de estudo consistiu na Bacia Hidrográfica do Rio Tibagi (BHRT), localizada na porção centro leste do Estado do Paraná (FIGURA 3.1), compreendendo superfície de 25000 km², aproximadamente 13% da extensão territorial do Estado. A BHRT possui dois tipos climáticos: *Cfa* – com temperaturas máximas acima de 22 °C; e, *Cfb* – com temperaturas máximas abaixo de 22 °C, sendo no mínimo quatro meses com temperaturas menores que 10 °C. Nos climas *Cfa* e *Cfb* a precipitação anual varia entre 1600 e 1900 mm (Alvares et al., 2013).

FIGURA 3.1 – LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIBAGI (BHRT), CONTENDO A DISTRIBUIÇÃO DE SUAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS, E RECORTE 10 km x 10 km PARA A ANÁLISE TEMPORAL (LDA-IPR e PGA-SIM).



FONTE: O Autor (2021)

A BHRT foi escolhida por apresentar características físico-climáticas distintas, em relação à posição geográfica. A distinção físico-climática foi desejável para avaliar a variabilidade espacial e temporal da evapotranspiração de referência diária (ET_o).

3.4.2 Estimativa da ET_o com modelo linear múltiplo

Baseando-se nas avaliações e resultados obtidos no Capítulo II, a ET_o foi estimada com o modelo Moretti-Jerszurki-Silva (MJS; Jerszurki et al., 2017), que considera o potencial hídrico atmosférico (ψ_{ar}) e radiação solar no topo da atmosfera (R_a).

$$ET_{oMJS(\psi_{ar};R_a)} = a + b \cdot Ee_i \quad (1)$$

$$Ee_i = k_{\psi ar} \cdot \frac{Ra_i}{\lambda} \quad (2)$$

$$k_{\psi ar.i} = \left| \frac{\psi_{ar.i} - \psi_{ar.min}}{\psi_{ar.max} - \psi_{ar.min}} \right| \quad (3)$$

$$\psi_{ar.i} = \frac{R \cdot T}{M_v} \cdot \ln\left(\frac{ea}{es}\right) = 0,46191456 \cdot T \cdot \ln(UR) \quad (4)$$

$$Ra_i = \frac{1440}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot d_r \cdot [(\omega_s \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta) + (\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s)] \quad (5)$$

$$\omega_s = \arccos [-\tan \varphi \cdot \tan \delta] \quad (6)$$

$$\delta = 0,409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J - 1,39\right)$$

Sendo: $ET_{O_{MJS}(\psi_{ar}; Ra)}$ – evapotranspiração de referência estimada com o modelo Moretti-Jerszurki-Silva (mm dia^{-1}); a – coeficiente linear da equação de regressão obtido da associação “ ψ_{ar} vs $ET_{O_{PM}}$ ” (mm dia^{-1}); b – coeficiente angular da equação de regressão obtido da associação “ ψ_{ar} vs $ET_{O_{PM}}$ ” (adimensional); Ee_i – evaporação equivalente de água no i -ésimo dia (mm dia^{-1}); $K_{\psi ar.i}$ – coeficiente de proporcionalidade do potencial hídrico atmosférico do i -ésimo dia (adimensional); Ra_i – radiação solar no topo da atmosfera no i -ésimo dia ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$; Allen et al., 2000); λ – calor latente de vaporização da água ($2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$); $\psi_{ar.i}$ – potencial hídrico atmosférico no i -ésimo dia (MPa); $\psi_{ar.max}$ – potencial hídrico atmosférico máximo encontrado no período analisado (MPa); $\psi_{ar.min}$ – potencial hídrico atmosférico mínimo encontrado no período analisado (MPa); R – Constante universal dos gases perfeitos ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$); T – temperatura média do ar do período considerado (K); M_v – Massa molar da água ($18 \cdot 10^{-1} \text{ m}^3 \text{mol}^{-1}$); ea – pressão atual do vapor do período considerado (MPa); es – pressão de saturação de vapor do período considerado (MPa); UR – umidade relativa do ar (adimensional); G_{sc} – constante solar ($G_{sc} = 0,0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{min}^{-1}$); d_r – distancia relativa Terra-Sol (adimensional); ω_s – ângulo horário correspondente ao pôr do Sol (radianos); φ – latitude do local (radianos); δ – declinação solar (radianos); J – dia Juliano (adimensional).

A calibração dos coeficientes a e b do modelo MJS foi realizada com os dados medidos em estações meteorológicas da BHRT, do período entre jan/2014 e dez/2018, conforme apresentado no Capítulo II: $a = -0,0888 \text{ mm dia}^{-1}$ e $b = 0,3683$, para $\psi_{ar.min} = 28,5 \text{ MPa}$ e $\psi_{ar.max} = 156,0 \text{ MPa}$. O método dos mínimos quadrados

e a ferramenta *solver* de uma planilha eletrônica foram utilizados no ajuste dos coeficientes (a e b).

A espacialização da Ra variou em função do dia Juliano (J ; dias) e latitude local (φ ; radianos), conforme Equação 5. Os valores de J e φ foram espacializados com um modulo de processamento criado no programa Qgis. O ψ_{ar} foi gerado com as imagens de temperatura (Te_{SR} ; °C) e umidade relativa do ar, estimadas com sensoriamento remoto (URe_{SR} ; %), que serviram de entrada na Equação 4. Com $\psi_{ar.min}$ e $\psi_{ar.max}$ obtidos no período de estudo, estimou-se $k_{\psi_{ar}}$ com a Equação 3. A Ee foi calculada com as imagens geradas de Ra e $k_{\psi_{ar}}$, conforme a Equação 2. Por fim, com a Ee espacializada e coeficientes a e b do modelo MJS calibrados, obteve-se $ETo_{MJS(\psi_{ar};Ra)}$ distribuída espacialmente (Equação 1).

Na estimativa da $ETo_{MJS(\psi_{ar};Ra)}$ foi utilizado como entrada a temperatura e umidade relativa do ar, obtida com o modelo linear múltiplo, estabelecido e calibrado no Capítulo II:

$$Te_{SR(Wp;Ts)} = a_2 \cdot Wp + a_1 \cdot Ts + a_0$$

$$URe_{SR(Wp;Ts)} = a_2 \cdot Wp - a_1 \cdot Ts + a_0$$

Sendo: $Te_{SR(Wp;Ts)}$ – temperatura do ar estimada com sensoriamento remoto por ajuste linear múltiplo (°C); Wp – coluna total de vapor d’água precipitável estimada com satélite Aqua MODIS, produto MYD05_L2 (cm); Ts – temperatura da superfície do solo estimada da banda 10 do satélite Landsat 8 (°C); $URe_{SR(Wp;Ts)}$ – umidade relativa do ar estimada com sensoriamento remoto, com ajuste linear múltiplo (%); a_2 , a_1 , a_0 – coeficientes da equação obtidos no ajuste linear múltiplo para temperatura ($a_2 = 1,75$ °C cm⁻¹; $a_1 = 0,52$, $a_0 = 3,25$ °C) e umidade relativa ($a_2 = 1,74$ °C cm⁻¹; $a_1 = -0,97$, $a_0 = 87,85$ °C).

3.4.3 Variabilidade espacial da $ETo_{MJS(\psi_{ar};Ra)}$

A BHRT foi a unidade geográfica utilizada para delimitar a análise espacial. A variabilidade dos valores (pixel da imagem) de $ETo_{MJS(\psi_{ar};Ra)}$ foram avaliados em imagens representando as estações do verão (04 de janeiro a 18 de fevereiro), outono (03 de abril a 26 de maio), inverno (08 de julho a 21 de agosto) e primavera

(08 de outubro a 10 de novembro), em cenários classificados com Índice de *El Niño* Oceânico (ONI), conforme GGWS (2021). Nas análises, foram considerados os anos: 2013, caracterizado dentro da Normalidade climatológica esperada para a região; 2015, *El Niño* predominante; e 2011, *La Niña* predominante. O intuito dos cenários consistiu em avaliar a variabilidade espacial da *ET_o* em diferentes situações climáticas ao longo das estações do ano.

As imagens de satélite utilizadas para estimar e analisar a variação da $ET_{oMJS(\psi_{ar};Ra)}$ na BHRT foram agrupadas por cenário climático (TABELA 3.1), identificando os satélites, orbita/ponto e datas das estações do ano.

TABELA 3.1 – DATA DE OBTENÇÃO DAS IMAGENS DOS SATÉLITES E SENSORES UTILIZADOS PARA ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL DA $ET_{oMJS(\psi_{ar};Ra)}$ NA BHRT, EM TRÊS CENÁRIOS CLIMÁTICOS, PARA AS QUATRO ESTAÇÕES DO ANO.

----- Satélites orbita/ponto -----		----- Estações do Ano -----			
Aqua – MODIS	Landsat – TIRS	Verão	Outono	Inverno	Primavera
----- Cenário Normal (Ano: 2013) -----					
	221/77	2013-01-10 ⁽²⁾	2013-05-26 ⁽¹⁾	2013-07-29 ⁽¹⁾	2013-11-10 ⁽²⁾
	221/78	2013-01-10 ⁽²⁾	2013-05-26 ⁽¹⁾	2013-07-29 ⁽¹⁾	2013-11-10 ⁽²⁾
h13v11	222/76	2013-02-18 ⁽²⁾	2013-05-01 ⁽¹⁾	2013-08-21 ⁽¹⁾	2013-11-09 ⁽¹⁾
	222/77	2013-02-18 ⁽²⁾	2013-05-01 ⁽¹⁾	2013-08-21 ⁽¹⁾	2013-10-08 ⁽¹⁾
----- Cenário <i>El Niño</i> (Ano: 2015) -----					
	221/77	2015-01-24 ⁽¹⁾	2015-05-16 ⁽¹⁾	2015-08-04 ⁽¹⁾	2015-10-07 ⁽¹⁾
	221/78	2015-02-09 ⁽¹⁾	2015-05-16 ⁽¹⁾	2015-08-04 ⁽¹⁾	2015-10-07 ⁽¹⁾
h13v11	222/76	2015-01-15 ⁽¹⁾	2015-05-07 ⁽¹⁾	2015-08-11 ⁽¹⁾	2015-10-14 ⁽¹⁾
	222/77	2015-01-15 ⁽¹⁾	2015-05-07 ⁽¹⁾	2015-08-11 ⁽¹⁾	2015-10-30 ⁽¹⁾
----- Cenário <i>La Niña</i> (Ano: 2011) -----					
	221/77	2011-01-29 ⁽³⁾	2011-04-19 ⁽³⁾	2011-07-08 ⁽³⁾	2011-11-05 ⁽²⁾
	221/78	2011-01-29 ⁽³⁾	2011-04-03 ⁽³⁾	2011-07-16 ⁽²⁾	2011-10-28 ⁽³⁾
h13v11	222/76	2011-01-04 ⁽³⁾	2011-04-10 ⁽³⁾	2011-07-15 ⁽³⁾	2011-11-04 ⁽³⁾
	222/77	2011-01-04 ⁽³⁾	2011-04-10 ⁽³⁾	2011-07-15 ⁽³⁾	2011-11-04 ⁽³⁾

⁽¹⁾ Imagens obtidas com o satélite Landsat 8; ⁽²⁾ Imagens obtidas com o satélite Landsat 7; ⁽³⁾ Imagens obtidas com o satélite Landsat 5. FONTE: O Autor (2021)

Cada cena do satélite Landsat 8 cobre área de 190 km (altura) por 180 km (largura). A imagem do satélite Aqua, sensor MODIS, cobre área de 2040 km (altura) por 2880 km (largura). Portanto, a imagem Aqua é 170 vezes maior que a do Landsat. Como a BHRT tem 25000 km², foram necessárias quatro cenas Landsat para cobrir toda a bacia e apenas uma imagem Aqua. Um mosaico de imagens Landsat 8 e Aqua MODIS foi realizado no *software* Qgis, para cada estação, em cada um dos cenários avaliados (Normal, *El Niño* e *La Niña*), gerando 12 mosaicos da BHRT.

a) Critérios para escolha das imagens de satélite

Para seleção das imagens utilizadas na estimativa da ET_o considerou-se os seguintes critérios e condições:

- i) A ET_o espacializada foi estimada considerando as estações do verão (21 de dezembro a 19 de março), outono (20 de março a 20 de junho), inverno (21 de junho a 21 de setembro) e primavera (22 de setembro a 20 de dezembro);
- ii) Deu-se preferência às imagens coletadas no meio de cada estação do ano (verão, outono, inverno e primavera), com a finalidade de obter a característica climática típica da estação;
- iii) Priorizou-se condições de céu claro, com até 40% de cobertura de nuvens, nas imagens de satélite Landsat;
- iv) Para a constituição do mosaico das imagens de entrada, para a estimativa da $ET_{o_{MJS(\psi_{ar};Ra)}}$ espacializada, estabeleceu-se diferença máxima de 30 dias entre as imagens;
- v) Deu-se preferência para as imagens coletadas com os satélites Landsat 5 e 8 e, na ocorrência de intensa cobertura de nuvens, utilizou-se o Landsat 7. As imagens Landsat 7 foram evitadas devido a existência de linhas com ausência de valor de dados nos pixels.

b) Restauração das imagens Landsat 7

As imagens Landsat 7 foram restauradas com processo de reamostragem com o Método do Vizinho mais Próximo (Boggione e Fonseca, 2004), para corrigir as linhas com dados ausentes, gerando imagens interpoladas com melhor qualidade. Utilizou-se o *software* Qgis para a correção das imagens, seguindo os procedimentos:

- i) Com o algoritmo “*Converter formato*” atribuiu-se aos pixels “sem dado” o valor zero na imagem de entrada. O procedimento tem que ser realizado com a imagem composta por apenas uma banda, pois composições de bandas de imagem não são aceitas no algoritmo;

ii) Posteriormente, no algoritmo “*Preenche sem dados*”, estimou-se o valor do pixel “sem dado” com a interpolação dos pixels vizinhos. A distância máxima de pesquisa dos pixels vizinhos foi definida em 10 pixels;

3.4.4 Variabilidade temporal da *ET_o*

A estimativa dos valores temporais de $ET_{oMJS(\psi_{ar};Ra)}$ entre imagens do satélite Landsat 8 foi feita por interpolação linear, utilizando como entrada imagens contendo menor percentual de nuvens possível em 2013 (ano de Normalidade climática), considerando a qualidade dos dados de entrada. Foram utilizadas apenas imagens para as orbita/ponto: 222/76 (representando o clima *Cfa*); e orbita/ponto 221/77 (representando o clima *Cfb*). A eficácia do algoritmo interpolador temporal “*r.series.interp*” foi testada em áreas de 10 km x 10 km na parte norte (Clima *Cfa*) e sul (Clima *Cfb*) da BHRT (FIGURA 3.1). A finalidade da interpolação foi gerar imagens sintéticas, na periodicidade diária, para um ano de análise (2013), utilizando apenas doze imagens (uma em cada mês).

a) Método de interpolação temporal

O algoritmo interpolador “*r.series.interp*” do provedor *Grass7* é uma ferramenta de processamento do *software* Qgis. Para configuração do algoritmo, preencheu-se os campos de informações obrigatórios da seguinte forma:

- i) “Camada(s) raster de entrada”: São as imagens com os valores de $ET_{oMJS(\psi_{ar};Ra)}$ gerada para as datas disponíveis pelos satélites. O nome de cada arquivo foi identificado com a data de imageamento;
- ii) “Posição do ponto para cada mapa de entrada”: Foram fornecidas as datas de obtenção da imagem de satélite, no formato número inteiro (sem separador), em ordem cronológica da imagem mais antiga à mais recente, dispondo o ano-mês-dia;
- iii) “Nome para o mapa raster de saída”: Nome da imagem interpolada de saída, em que cada arquivo foi identificado pela data interpolada de interesse (o nome de cada imagem de saída tem de ser separado por vírgula);
- iv) “Posição do ponto de amostragem para cada mapa de saída”: É a data da imagem interpolada de interesse, no formato de número inteiro (sem separador), em

ordem cronológica da imagem mais antiga à mais recente, conforme ano-mês-dia (cada data tem de ser separada por virgula);

v) “Método de interpolação linear”: Testou-se o único método suportado atualmente pelo algoritmo do programa “*r.series.interp*” (linear).

Com os resultados da interpolação também foi possível gerar as ET_o interpoladas com o modelo Moretti-Jerszurki-Silva ($ET_{oMJS(\psi ar; Ra)_{int}}$), para os dias entre imagens Landsat disponíveis ou com cobertura de nuvens acima de 40%.

b) Imagens de satélite

As imagens de satélite selecionadas para região (órbita/ponto 222/76 e 221/77) foram adquiridas ao longo de 2013, sendo escolhida uma imagem por mês (TABELA 3.2), com no máximo 30 a 40% de cobertura de nuvens, critério que pode ser indicado no momento da obtenção da imagem. Amostrou-se uma imagem por mês, para que o conjunto de dados de entrada aproximasse da realidade climática da região, bem como permitisse verificar a qualidade dos resultados entre os meses.

TABELA 3.2 – SENSORES E DATA DE OBTENÇÃO DAS IMAGENS DOS SATÉLITES EM 2013, UTILIZADAS NA ANÁLISE DA VARIABILIDADE TEMPORAL DA $ET_{oMJS(\psi ar; Ra)_{int}}$, NA BHRT.

Satélites órbita/ponto		Meses												
Aqua MODIS	Landsat TIRS	Clima	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
		Dias												
h13v11	221/77	<i>Cfb</i>	10 ⁽¹⁾	11 ⁽¹⁾	31 ⁽¹⁾	16 ⁽¹⁾	26 ⁽²⁾	11 ⁽²⁾	29 ⁽²⁾	30 ⁽²⁾	07 ⁽¹⁾	09 ⁽¹⁾	10 ⁽¹⁾	04 ⁽²⁾
	222/76	<i>Cfa</i>	01 ⁽¹⁾	18 ⁽¹⁾	22 ⁽¹⁾	23 ⁽¹⁾	01 ⁽²⁾	18 ⁽²⁾	04 ⁽²⁾	21 ⁽²⁾	22 ⁽²⁾	08 ⁽²⁾	09 ⁽²⁾	11 ⁽²⁾

⁽¹⁾ Imagens obtidas com o satélite Landsat 7; ⁽²⁾ Imagens obtidas com o satélite Landsat 8. FONTE: O Autor (2021).

c) Validação das estimativas da $ET_{oMJS(\psi ar; Ra)_{int}}$

A validação da ET_o obtida com o método alternativo interpolado (MJS; $ET_{oMJS(\psi ar; Ra)_{int}}$) foi avaliada em associações com a ET_o estimada com o método padrão Penman-Monteith ASCE (ET_{oPM} ; ASCE-EWRI, 2005). Foram feitas estimativas da ET_{oPM} para todos os dias do ano em que houve dados diários disponíveis, para as estações LDA-IPR e PGA-SIM (TABELA 3.3). As estações foram escolhidas por apresentarem menos pontos divergentes entre as observações com o modelo de PM-ASCE e MJS, conforme verificado no Capítulo II, e por estarem em condições climáticas distintas.

TABELA 3.3 – IDENTIFICAÇÃO, LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TIGABI, UTILIZADAS NAS ANÁLISES.

Identificação	Estação	Instituto	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Clima
LDA-IPR	Londrina	IAPAR	23°13'12,00" S	51°06'00,00" W	585	Cfa
PGA-SIM	Ponta Grossa	SIMEPAR	25°00'49,32"S	50°09'08,64"W	885	Cfb

FONTE: O Autor (2020).

O modelo Penman-Monteith ASCE (ASCE-EWRI, 2005; APÊNDICE 4) foi calculado utilizando dados diários medidos nas estações meteorológicas ($ET_{o_{PM}}$; Equação 7), enquanto o modelo alternativo MJS (Equação 1) utilizou as variáveis meteorológicas especializadas (Te_{SR} e $UR_{e_{SR}}$) como entrada.

$$ET_{o_{PM}} = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma \cdot \frac{Cn}{(T + 273)} \cdot u_2 \cdot (es - ea)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + Cd \cdot u_2)} \quad (7)$$

Sendo: $ET_{o_{PM}}$ – evapotranspiração de referência calculada com o modelo Penman-Monteith ASCE (mm dia^{-1}); Δ – declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); Rn – saldo de radiação diário ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); G – balanço do fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); γ – constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); T – temperatura média diária do ar ($^\circ\text{C}$); Cn – constante do numerador relacionada à superfície de referência e intervalo de tempo adotados ($Cn = 900 \text{ kJ}^{-1} \text{ kg K}$ para culturas de porte baixo); Cd – coeficiente de vento para a cultura de referência ($Cd = 0,34 \text{ kJ}^{-1} \text{ kg K}$); es – pressão de saturação de vapor d'água (kPa); ea – pressão atual de vapor d'água (kPa); u_2 – velocidade média diária do vento a dois metros de altura (m s^{-1}).

As associações “ $ET_{o_{PM}}$ vs $ET_{o_{MJS}(\psi_{ar}; Ra)_{int}}$ ” foram avaliadas em regressões lineares simples e por meio de índices, coeficientes e erros (Item 3.4.5).

3.4.5. Análise estatística

As análises estatísticas da validação consistiram na verificação das associações entre: “ $ET_{o_{PM}}$ estimada com dados das estações meteorológicas” vs. “ $ET_{o_{MJS}(\psi_{ar}; Ra)_{int}}$ interpolada com o algoritmo *r.series.interp*”. Os índices, erros e coeficientes foram calculados conforme Souza (2018):

– Índice de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NSE):

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \right]$$

– Índice de concordância “*d*”:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right]$$

– Raiz do erro quadrático médio (*RMSE*):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{n}}$$

– Erro relativo percentual absoluto médio (*ERPAM*_%):

$$ERPAM_{\%} = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{E_i - O_i}{O_i} \cdot 100 \right|}{n}$$

– Coeficiente de correlação de Pearson (*r*):

$$r = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}}$$

Sendo: *d* – índice “*d*” de concordância de Willmott et al. (1985) (adimensional); *RMSE* – Raiz do erro quadrático médio (unidade da variável); *ERPAM*_% – Erro relativo percentual absoluto médio (%); *r* – Coeficiente de correlação de Pearson (adimensional); *E_i* – *i*-ésimo valor estimado da variável dependente, com os dados remotos (unidade da variável); *O_i* – *i*-ésimo valor observado da variável independente, obtida das estações meteorológicas (unidade da variável); \bar{O} – média dos valores observados da variável independente, obtida das estações meteorológicas (unidade da variável); *n* – número de dados observados (adimensional); *r* – coeficiente de correlação de Pearson (adimensional).

Para testar se o valor de *r* é estatisticamente igual ao coeficiente de correlação populacional (ρ ; igual a zero), aplicou-se o teste de hipótese:

$$H_0: \rho = 0$$

$$H_1: \rho \neq 0$$

Os valores do teste t de *Student* foram comparados com os valores de t calculado (t_{calc}), com a expressão:

$$t_{calc} = \frac{r - \rho}{\sqrt{\frac{1 - r^2}{v}}}$$

$$v = n - p - 1$$

Sendo: t_{calc} – valor de t calculado; r – coeficiente de correlação da amostra; ρ – coeficiente de correlação da população; v – graus de liberdade; r^2 – coeficiente de determinação; n – número de dados da análise de regressão; p – número de parâmetros da regressão (para regressão linear tem apenas o parâmetro a_1)

O teste t foi calculado com auxílio de uma planilha eletrônica. No cálculo do $t_{critico}$ (tabelado) foi utilizada a função referente ao inverso da distribuição de t bicaudal. O nível de significância do valor de r foi testado a 99%(**) de significância. Não atendendo o requisito testou-se a 95%(*), e não atendendo ambos critérios o valor de r foi considerado não-significativo(^{ns}).

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1 Variabilidade espacial da $ET_{O_{MJS}(\psi_{ar};Ra)}$ na BHRT

No mosaico de imagens das estações do ano (FIGURA 3.2) ficou bem identificado os limites das cenas que compõem a BHRT, principalmente nas imagens do outono de 2013 e 2015, e inverno de 2011. As imagens não ficaram homogêneas, pois para cobrir toda a bacia em estudo teve-se que utilizar imagens de diferentes dias para representar as ET_{O} da BHRT. As orbitas/pontos 222/76, 222/77 (parte norte da bacia), 221/77 e 221/78 (parte sul da bacia) não passam sobre o mesmo local, no mesmo dia. Por isso, o mosaico da mesma estação do ano foi constituído por datas diferentes (TABELA 3.1).

A diferença da $ET_{O_{MJS}(\psi_{ar};Ra)}$ média para a BHRT (FIGURA 3.2), entre os cenários Normal e *El Niño*, foi de 0,78 mm dia⁻¹ no verão, 0,02 mm dia⁻¹ no outono, 0,01 mm dia⁻¹ no inverno e 0,66 mm dia⁻¹ na primavera. Entre os cenários Normal e *La Niña*, a diferença média da $ET_{O_{MJS}(\psi_{ar};Ra)}$ foi de 0,37, 0,44, 0,47, 0,09 mm dia⁻¹ no verão, outono, inverno e primavera, respectivamente. Considerando-se as

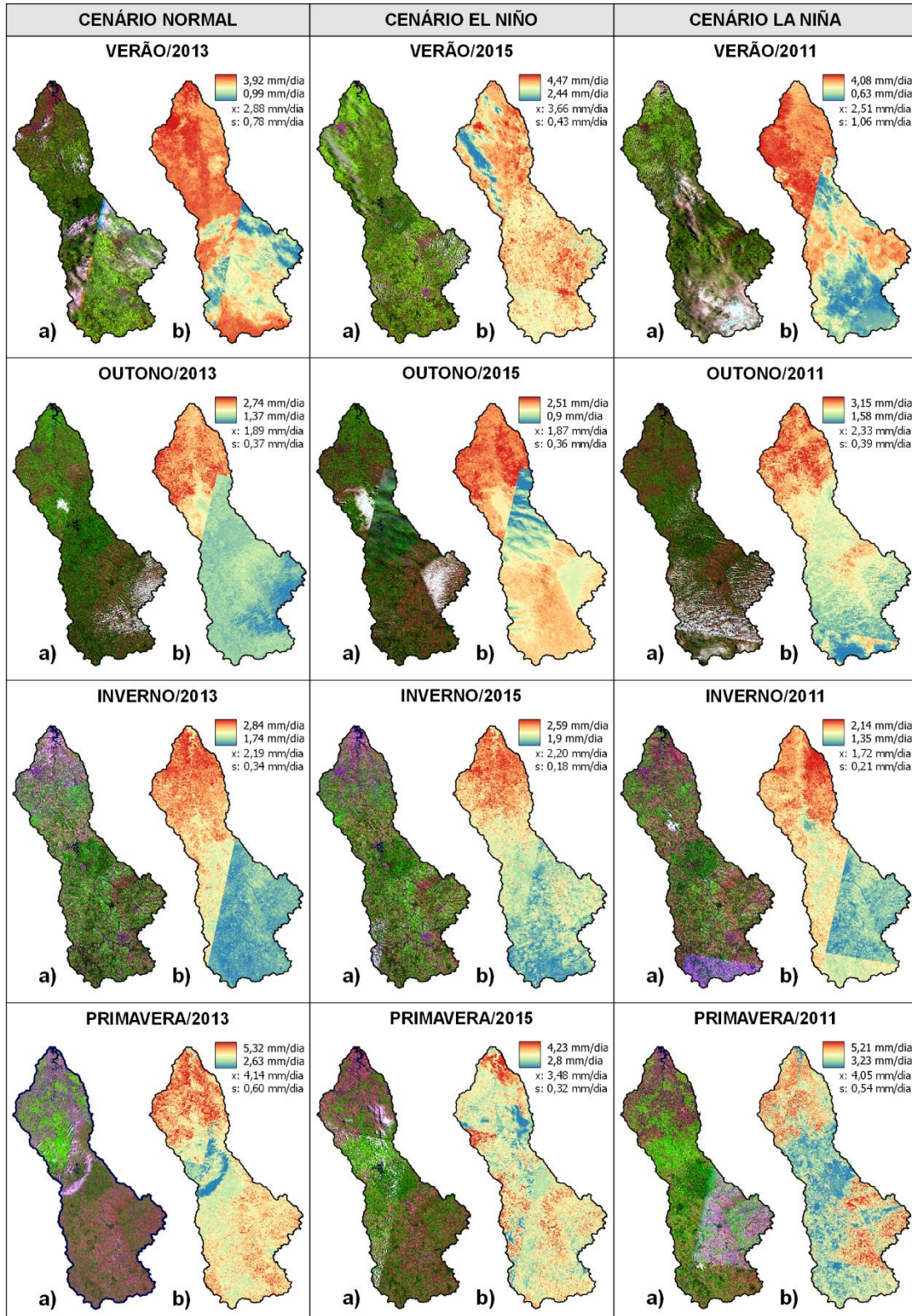
menores diferenças médias entre os valores de evapotranspiração estimados espacialmente, o cenário Normal no outono e inverno (estações mais frias; FIGURA 3.2) foi semelhante ao cenário *El Niño*. No verão e na primavera (estações mais quentes; FIGURA 3.2) o cenário Normal foi semelhante ao *La Niña*.

A ET_{OPM} média estimada com dados medidos em estações meteorológicas não apresentou diferença na mesma estação do ano, para os cenários climáticos (*La Niña*, Normal e *El Niño*). Porém, houve diferença entre os tipos climáticos *Cfa* e *Cfb* analisados (TABELA 3.4). Entretanto, a $ET_{O_{MJS}(\psi_{ar};Ra)}$ espacializada média apresentou diferença na mesma estação do ano, entre os cenários climáticos (FIGURA 3.2). A média da $ET_{O_{MJS}(\psi_{ar};Ra)}$ obtida com sensoriamento remoto para a bacia foi calculada considerando todos os valores de evapotranspiração, estimadas nos 27.704.045 pixels (aproximadamente) na BHRT. O intervalo de confiança da média da $ET_{O_{MJS}(\psi_{ar};Ra)}$ é muito estreito e próximo da média verdadeira, devido ao tamanho da amostra.

A diferença nos resultados entre a ET_{OPM} (estimada com dados medidos em estações meteorológicas) e $ET_{O_{MJS}(\psi_{ar};Ra)}$ (estimada com dados remotos) pode estar relacionado à série insuficiente de dados para a estimativa espacial da evapotranspiração com o modelo de Penman-Monteith. Na estimativa da evapotranspiração espacializada a variabilidade espacial e o tamanho da BHRT contribuíram para evidenciar diferenças entre as médias na mesma estação do ano, em diferentes cenários.

A ET_{OPM} estimada para o clima *Cfa* (estação meteorológica LDA-IPR) a *Cfb* (estação meteorológica PGA-SIM) não apresentou variação espacial (pois as estações não variaram espacialmente), mas houve variação temporal. Dessa forma, os eventos ENOS (que representaram variação temporal) não influenciaram a variação da ET_{OPM} (medida no local da estação meteorológica) na mesma estação do ano, bem como entre os anos (TABELA 3.4).

FIGURA 3.2 – VARIABILIDADE ESPACIAL DA $ET_{oMJS(\psi_{ar};Ra)}$ NA BHRT, NAS ESTAÇÕES DO ANO E CENÁRIOS NORMAL (ANO 2013), *EL NIÑO* (ANO 2015) E *LA NIÑA* (2011), SENDO: a) COMPOSIÇÃO COLORIDA FALSA COR, PARA VISUALIZAÇÃO DA COBERTURA DE NUVENS; E b) IMAGEM COM VALORES DE $ET_{oMJS(\psi_{ar};Ra)}$ (mm dia⁻¹) ESTIMADA COM DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO (“x” É A MÉDIA E “s” O DESVIO PADRÃO DOS VALORES DE $ET_{oMJS(\psi_{ar};Ra)}$ NA BACIA).



Fonte: O Autor (2021)

TABELA 3.4 – MÉDIAS DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E RESPECTIVOS ERROS PADRÃO DA MÉDIA ($\pm e$), ESTIMADOS A 95% DE PROBABILIDADE COM O TESTE Z PADRONIZADO, PARA OS CLIMAS *Cfa* E *Cfb*, NAS ESTAÇÕES DO ANO DE 2011 (*LA NIÑA*), 2013 (NORMAL) E 2015 (*EL NIÑO*): TEMPERATURA MÉDIA DO AR (T), UMIDADE RELATIVA DO AR (UR), VELOCIDADE DO VENTO (u), RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (R_s) E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ESTIMADA COM O MODELO DE PENMAN-MONTEITH (ET_{OPM}).

Anos	$T_{(Cfa)}$ ---- (°C) ----	$T_{(Cfb)}$ ---- (°C) ----	$UR_{(Cfa)}$ ----- (%) -----	$UR_{(Cfb)}$ ----- (%) -----	$u_{(Cfa)}$ ---- (km h ⁻¹) ----	$u_{(Cfb)}$ ---- (km h ⁻¹) ----	$R_{s(Cfa)}$ ---- (MJ m ⁻² dia ⁻¹) ----	$R_{s(Cfb)}$ ---- (MJ m ⁻² dia ⁻¹) ----	$ET_{OPM (Cfa)}$ ----- (mm dia ⁻¹) -----	$ET_{OPM (Cfb)}$ ----- (mm dia ⁻¹) -----
----- Variação sazonal: Verão -----										
2011	24,0	21,2	77,2	82,4	8,2	10,2	19,8	20,0	4,3	4,1
<i>e</i>	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$	$\pm 1,9$	$\pm 1,3$	$\pm 0,7$	$\pm 0,7$	$\pm 0,7$	$\pm 0,7$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$
2013	23,7	20,8	76,6	83,3	8,9	11,0	19,9	20,3	4,4	4,1
<i>e</i>	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	$\pm 2,3$	$\pm 1,5$	$\pm 0,7$	$\pm 0,8$	$\pm 0,7$	$\pm 0,7$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$
2015	24,1	21,8	78,4	83,1	7,2	9,4	19,8	20,7	4,3	4,2
<i>e</i>	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$	$\pm 2,1$	$\pm 1,3$	$\pm 0,5$	$\pm 0,6$	$\pm 0,7$	$\pm 0,6$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$
Média	23,9	21,3	77,4	82,9	8,1	10,2	19,8	20,3	4,3	4,1
----- Variação sazonal: Outono -----										
2011	19,3	16,4	70,9	81,6	7,8	10,8	14,4	13,9	2,9	2,5
<i>e</i>	$\pm 0,7$	$\pm 0,7$	± 2	$\pm 1,1$	$\pm 0,6$	$\pm 0,8$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$
2013	19,8	16,8	75,6	82,1	7,1	10,1	13,5	13,7	2,7	2,5
<i>e</i>	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 2,5$	$\pm 1,7$	$\pm 0,5$	$\pm 0,9$	$\pm 0,7$	$\pm 0,7$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$
2015	20,6	17,4	75,2	82,5	7,5	11,3	13,9	13,2	2,8	2,5
<i>e</i>	$\pm 0,6$	$\pm 0,6$	$\pm 1,9$	$\pm 1,3$	$\pm 0,5$	$\pm 0,9$	$\pm 0,6$	$\pm 0,6$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$
Média	19,9	16,9	73,9	82,1	7,5	10,7	13,9	13,6	2,8	2,5
----- Variação sazonal: Inverno -----										
2011	18,4	14,4	64,4	81,0	8,4	12,1	15,1	13,6	3,2	2,3
<i>e</i>	$\pm 0,8$	$\pm 0,8$	± 3	$\pm 2,1$	$\pm 0,6$	$\pm 1,1$	$\pm 0,8$	$\pm 0,8$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$
2013	18,4	14,8	64,3	79,2	8,3	11,7	15,1	14,5	3,1	2,5
<i>e</i>	$\pm 0,9$	$\pm 0,8$	$\pm 3,5$	$\pm 2,4$	$\pm 0,6$	$\pm 1,0$	$\pm 0,9$	$\pm 0,8$	$\pm 0,3$	$\pm 0,2$
2015	19,3	16,2	69,0	79,7	7,2	10,7	14,4	14,0	2,9	2,6
<i>e</i>	$\pm 0,6$	$\pm 0,6$	$\pm 3,4$	$\pm 2,0$	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$	$\pm 0,9$	$\pm 0,8$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$
Média	18,7	15,1	65,9	80,0	8,0	11,5	14,9	14,0	3,1	2,5
----- Variação sazonal: Primavera -----										
2011	22,5	18,7	61,4	75,6	10,0	13,3	21,9	22,0	5,1	4,4
<i>e</i>	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 3,3$	$\pm 2,0$	$\pm 0,7$	$\pm 0,9$	$\pm 0,8$	$\pm 0,8$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$
2013	22,6	19,0	65,4	77,2	10,9	13,9	21,2	21,2	5,0	4,3
<i>e</i>	$\pm 0,6$	$\pm 0,6$	$\pm 3,1$	$\pm 1,7$	$\pm 0,8$	$\pm 0,8$	$\pm 0,8$	$\pm 0,8$	$\pm 0,3$	$\pm 0,2$
2015	23,4	20,3	77,3	83,8	7,9	12,3	19,3	20,0	4,2	4,0
<i>e</i>	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 3,2$	$\pm 1,8$	$\pm 0,6$	$\pm 0,7$	$\pm 0,9$	$\pm 0,8$	$\pm 0,3$	$\pm 0,2$
Média	22,8	19,3	68,0	78,9	9,6	13,2	20,8	21,1	4,8	4,2
----- Variação Interanual -----										
2011	21,0	17,6	68,4	80,2	8,6	11,6	17,7	17,3	3,8	3,3
<i>e</i>	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$	$\pm 1,5$	$\pm 0,9$	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$
2013	21,1	17,8	70,4	80,5	8,8	11,7	17,4	17,4	3,8	3,3
<i>e</i>	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$	$\pm 1,6$	$\pm 1,0$	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$
2015	21,8	18,9	74,9	82,2	7,4	10,9	16,8	16,9	3,5	3,3
<i>e</i>	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$	$\pm 1,4$	$\pm 0,8$	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$

FONTE: O Autor (2021)

A utilização de apenas um ano de observação para cada cenário pode ter contribuído para a ausência de variação da $ET_{o_{PM}}$ entre os eventos ENOS, na mesma estação. Meza (2005), avaliando 23 anos de evapotranspiração no Chile Central, obteve diferenças da variável entre as estações do ano, sendo que no outono e inverno a ET_o nos períodos de *La Niña* e Normal foram semelhantes e superiores ao período *El Niño*. No entanto, na primavera e verão o período Normal foi superior à *La Niña* e *El Niño*, que apresentaram valores mais próximos.

Logo, para uma análise mais consistente seria necessário que se aumentasse a série de dados, a fim de constatar maior variação da evapotranspiração, devido aos eventos ENOS. O maior problema para uma análise deste tipo consiste em conseguir obter anos com eventos ENOS bem característicos, contendo imagens de satélite e série de dados meteorológicos sem falhas.

As maiores diferenças na $ET_{o_{PM}}$ média foram observadas entre os climas *Cfa* e *Cfb*, no inverno ($0,6 \text{ mm dia}^{-1}$) e primavera ($0,6 \text{ mm dia}^{-1}$), bem como maior magnitude da evapotranspiração média dos climas no verão ($4,2 \text{ mm dia}^{-1}$) e primavera ($4,5 \text{ mm dia}^{-1}$), e menor no outono ($2,7 \text{ mm dia}^{-1}$) e inverno ($2,8 \text{ mm dia}^{-1}$) (TABELA 3.4). A mesma tendência (diferença e magnitude) da evapotranspiração foi constatada para a $ET_{o_{MJS(\Psi_{ar};Ra)}}$ espacializada na BHRT (FIGURA 3.2), sendo os maiores valores ao norte da bacia (*Cfa*) e os menores ao sul (*Cfb*).

Assim como apresentado na FIGURA 3.2, Matzenauer et al. (2008) também observaram no Rio Grande do Sul maiores valores de $ET_{o_{PM}}$ (estimado com modelo Penman-Monteith) na primavera, durante os evento de *La Niña* e anos Normais, bem como constataram maior $ET_{o_{PM}}$ no inverno somente nos anos Normais. Streck et al. (2008), estudando a evaporação média diária medida no tanque Classe A (ECA), no Rio Grande do Sul, verificaram menor valor de ECA em anos de *El Niño*, maior em anos de *La Niña* e intermediário em anos Normais. A média da $ET_{o_{MJS(\Psi_{ar};Ra)}}$ espacializada de cada cenário (FIGURA 3.2) na BHRT ficou em: $2,77 \text{ mm dia}^{-1}$ para o cenário Normal; $2,80 \text{ mm dia}^{-1}$ para *El Niño*; e $2,65 \text{ mm dia}^{-1}$ para *La Niña*. Os resultados do presente estudo concordam com Matzenauer et al. (2008), mas diferem de Streck et al. (2008). As diferenças de resultados podem estar relacionadas a uma série de motivos, como: métodos diferentes utilizados para estimar a evapotranspiração; a nebulosidade estimada com sensor remoto pode

proporcionar erros no cálculo da evapotranspiração; o tamanho da série temporal pode interferir e levar a resultados diferentes; Fan et al. (2017) comenta que eventos ENOS podem conduzir a condições climáticas diferentes.

O tipo de cobertura do solo tem relação direta com a ET_{OPM} , tendo em vista que parte da radiação incidente será refletida pela superfície (albedo). A $ET_{OMJS(\psi_{ar};Ra)}$ não é influenciada diretamente pelo albedo, mas indiretamente sobre a ação da T e UR modificada, conforme o tipo da superfície. Toda superfície que recebe certa quantidade de radiação tende a aumentar sua temperatura, e consecutivamente a sua emissão, conforme a Lei de Stephan-Boltzmann. O sensor orbital no satélite capta a energia do sol (Radiação Eletromagnética) refletida por uma superfície em determinado comprimento de onda (Meneses e Almeida, 2012). Portanto, objetos claros como solo exposto (tonalidade magenta na FIGURA 3.2a) refletem muita energia, e objetos escuros como a vegetação densa (tonalidade verde escuro na FIGURA 3.2a) refletem menos energia para o sensor. Na espacialização da $ET_{OMJS(\psi_{ar};Ra)}$ verificou-se que os maiores valores ocorreram em locais com solo exposto e os menores em área mais vegetadas, indicando que na BHRT a evapotranspiração foi maior quando a temperatura local foi mais alta, o que é consistente. Os resultados obtidos indicaram que a $ET_{OMJS(\psi_{ar};Ra)}$ (estimada com dados remotos) variaram com o uso do solo, e a metodologia de espacialização da evapotranspiração mostrou-se promissora para estimar a demanda da água pela atmosfera, levando em consideração as condições locais, principalmente onde não há informações de estações meteorológicas próximas.

Oliveira et al. (2015) analisando o saldo de radiação (Rn) na bacia do Tapacurá, em Pernambuco, observaram menor magnitude da Rn em áreas urbanas e solo exposto (altos valores de albedo e temperatura de superfície) e maior magnitude em áreas vegetadas e corpos hídricos (baixos valores de albedo e temperatura de superfície). Os resultados obtidos no presente estudo concordam com Oliveira et al. (2015), pois onde foi encontrado solo exposto observou-se maiores magnitudes de $ET_{OMJS(\psi_{ar};Ra)}$, e o contrário foi constatado na áreas mais vegetadas na BHRT. A comparação entre os estudos pode ser feita baseada na relação direta que há entre a temperatura de superfície, temperatura do ar e evapotranspiração (Mutiibwa et al, 2015; Boeira et al, 2020).

Durante o desenvolvimento metodológico uma das dificuldades foi ter que associar imagens diferentes (Landsat e Aqua) para a execução de alguns módulos de processamento. Para a geração da $Te_{SR(Wp;Ts)}$ e $UR_{e_{SR(Wp;Ts)}}$ o nome dos arquivos das imagens dos satélites precisou ser organizado conforme a data de imageamento, para que os respectivos dados diários de temperatura e umidade relativa do ar fossem inseridos no módulo de processamento de forma mais rápida e ágil. O Landsat disponibiliza os seus arquivos nomeados com a data (ano-mês-dia), mas no Aqua/MODIS a nomeação é feita com o dia juliano. Assim, para realizar as associações “ Wp vs Ts vs URm_{EM} ” e “ Wp vs Ts vs Tm_{EM} ”, as variáveis Wp e Ts tiveram que ser organizadas e renomeadas pela sua data de obtenção. A organização dos arquivos permitiu que a geração da temperatura e umidade espacializadas fossem realizadas para várias imagens, com o auxílio do módulo de processamento do Qgis. Porém, o processo de renomeação dos arquivos teve que ser feito imagem a imagem, o que demandou tempo no preparo dos dados.

O *script* desenvolvido em linguagem Python (APÊNDICE 1), para transformar o arquivo hdf (Aqua/MODIS) em geotiff (formato aceito no Qgis), permitiu transformar apenas uma a uma das imagem de interesse, o que tornou o processo de geração da imagem final de Wp mais demorado também. Os módulos de processamento desenvolvidos no Qgis ajudaram muito na velocidade do processamento das imagens. Entretanto, o algoritmo “Calculadora *Raster*”, utilizado em quase todos os módulos, não conseguiu ser utilizado como dado de entrada durante o fluxo de trabalho. Com a ineficiência do algoritmo, a metodologia teve de ser dividida em vários módulos de processamentos até se chegar ao resultado final no cálculo da $ET_{O_{MJS(\psi_{ar};Ra)}}$ espacializada, demandando mais tempo de processamento. A automatização de várias imagens ao mesmo tempo, com apenas um *script* para gerar a Wp e modulo para gerar a $ET_{O_{MJS(\psi_{ar};Ra)}}$, seria o ideal para acelerar o processamento. Um procedimento desta forma garantiria maior uso da metodologia estabelecida, o que poderia ser viabilizado programando rotinas em linguagem Python (linguagem em que são desenvolvidos os algoritmos dentro do Qgis).

A principal dificuldade no desenvolvimento e aplicação da metodologia foram as várias etapas a serem realizadas, entre a obtenção das imagens e processamento dos dados de sensoriamento remoto, levando meses para se chegar ao cálculo da $ET_{O_{MJS(\psi_{ar};Ra)}}$ final, em toda a bacia. Além disso, os módulos de

processamento passaram por várias etapas de teste até conseguir gerar o produto final esperado. Para difundir o uso da metodologia proposta no presente estudo, uma das alternativas seria a elaboração de um sistema *online* em conjunto com a plataforma *Google Earth Engine*, como o algoritmo SSEBop-Br (ANA, 2020), automatizando a obtenção de imagens. Um sistema desse tipo teria acesso às imagens de satélite e dados meteorológicos diretamente das plataformas de origem, possibilitando a aplicação dos cálculos da metodologia proposta no presente trabalho, mediante os dados obtidos. Outra opção seria o desenvolvimento de um programa (complemento) executável dentro do Qgis, utilizando a linguagem Python.

Os modelos remotos desenvolvidos baseando-se no balanço de energia de superfície – Modelo de Mapeamento da Evapotranspiração em Alta Resolução, com Modelo de Calibração Internalizada (METRIC; Allen et al., 2007; Venancio et al, 2020); e Modelo de Balanço de Energia de Superfície Simplificado Operacional (SSEBop; Senay et al, 2016; ANA, 2020) –, já possuem uma plataforma que disponibiliza imagens de evapotranspiração prontas, indicando a possibilidade de dinamizar a metodologia proposta no presente trabalho. No Capítulo II verificou-se a eficiência da estimativa da $ET_{o_{MJS(\psi_{ar};Ra)}}$ com a mesma metodologia proposta. As plataformas para modelos como o METRIC foram desenvolvidas justamente pela dificuldade de se ter à disposição dados meteorológicos de qualidade, calibração específica e pessoal técnico especializado para a aplicação das diversas equações do modelo (Allen et al., 2011).

A vantagem da $ET_{o_{MJS(\psi_{ar};Ra)}}$ espacializada consiste em estimá-la para locais contendo pouca informação meteorológicas, como no Norte do Brasil (região amazônica) e outras regiões, em que a quantidade de estações é menor quando comparada ao sul do Brasil. Mesmo na BHRT, tendo diferenças de evapotranspiração em função dos uso e cobertura do solo, houve coerência entre a relação da Rn e $ET_{o_{MJS(\psi_{ar};Ra)}}$. Portanto, utilizar valores estimados espacialmente para determinado local pode ser mais interessante do que usar o valor da $ET_{o_{PM}}$ de uma estação que se encontra a muitos quilômetros de distância da área em estudo. Ou, quando for o caso, possibilitar a determinação da evapotranspiração de grandes áreas, como uma bacia hidrográfica.

A evapotranspiração espacializada pode ter uma série de aplicações, como na fiscalização do volume de água para irrigação, espedido nas outorgas de água pelos órgãos competentes. Sado et al. (2018) precisou e teve dificuldade para obter dados de precipitação efetiva espacializada (obtida com o satélite TRMM) e evapotranspiração real da cultura para a Bacia Hidrográfica do Alto São Marcos, região central do Brasil. Considera-se que a utilização de valores de $ET_{O_{MJS}(\psi_{ar};Ra)}$ espacializada e coeficientes de cultivo (kc) local podem ser uteis para estimar o volume de água necessário nas irrigações, permitindo monitorar o cumprimento das cotas de uso de água permitidas nas outorgas.

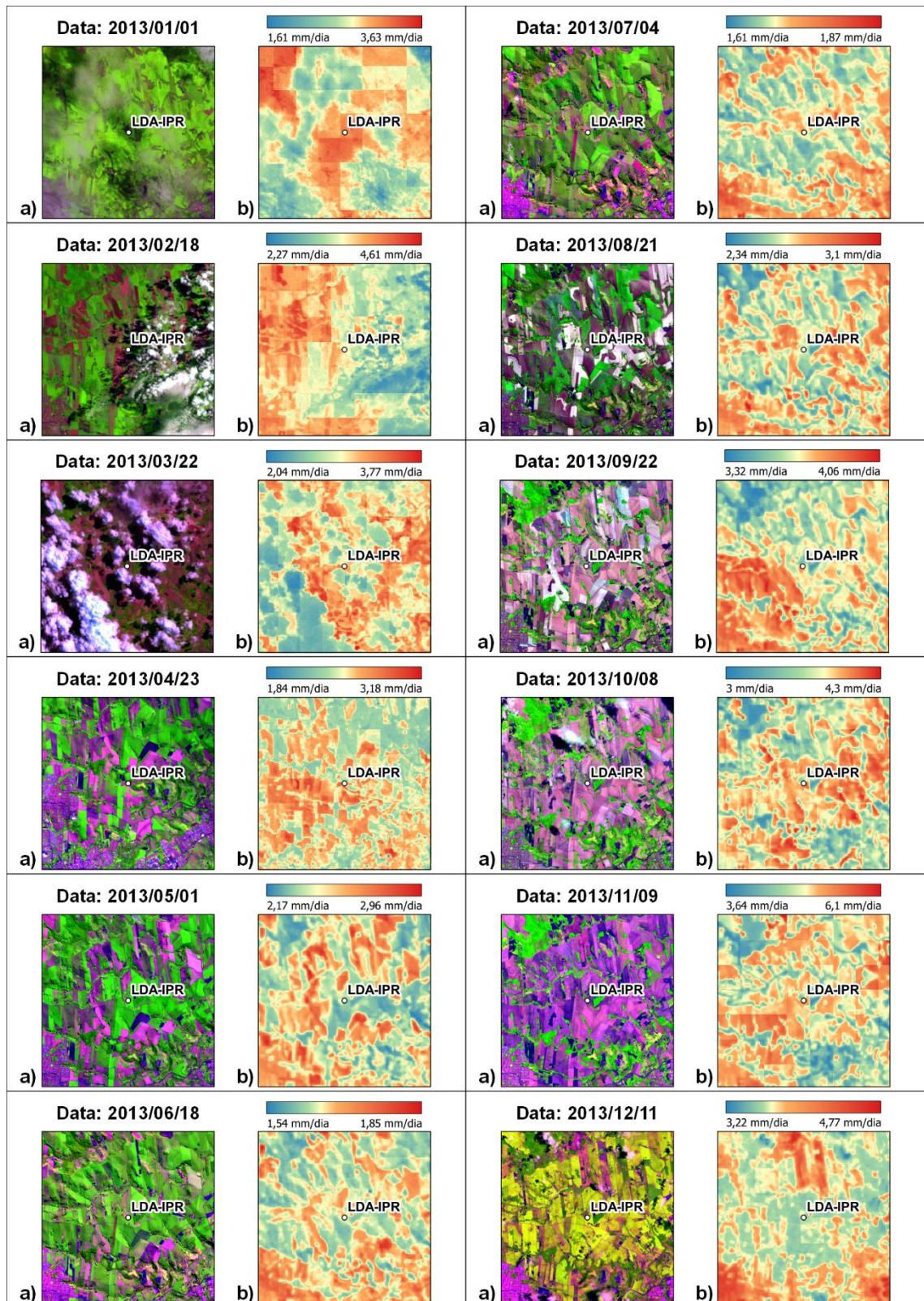
Paula et al. (2019) obtiveram estimativas promissoras da evapotranspiração real com o modelo SSEBop, na bacia do rio Preto, Distrito Federal, realizando o manejo de irrigação com pivô central. No presente estudo, avaliou-se apenas a evapotranspiração de referencia espacializada, mas a metodologia também poderá ser usado no ajuste da lamina de irrigação baseando-se na $ET_{O_{MJS}(\psi_{ar};Ra)}$.

3.5.2 Variabilidade temporal da $ET_{O_{MJS}(\psi_{ar};Ra)}$

As melhores imagens de cada mês (menor cobertura de nuvem possível) do ano de 2013, para os climas *Cfa* e *Cfb*, foram obtidas nas datas que constam nas FIGURAS 3.3 e 3.4, respectivamente. Conforme os critérios estabelecidos para a escolha das imagens que serviram de entrada para a interpolação temporal, doze imagens do clima *Cfa* (FIGURA 3.3) foram utilizadas para a estimativa da evapotranspiração de referência diária. No clima *Cfb* (FIGURA 3.4) foram excluídas da análise as imagens do mês de fevereiro (11/02/2013) e junho (11/06/2013), devido à cobertura de nuvem de toda a área de estudo no período. Considerou-se que os dados precisavam ser excluídos, pois seriam fonte de erro e imprecisão no resultado final das estimativas.

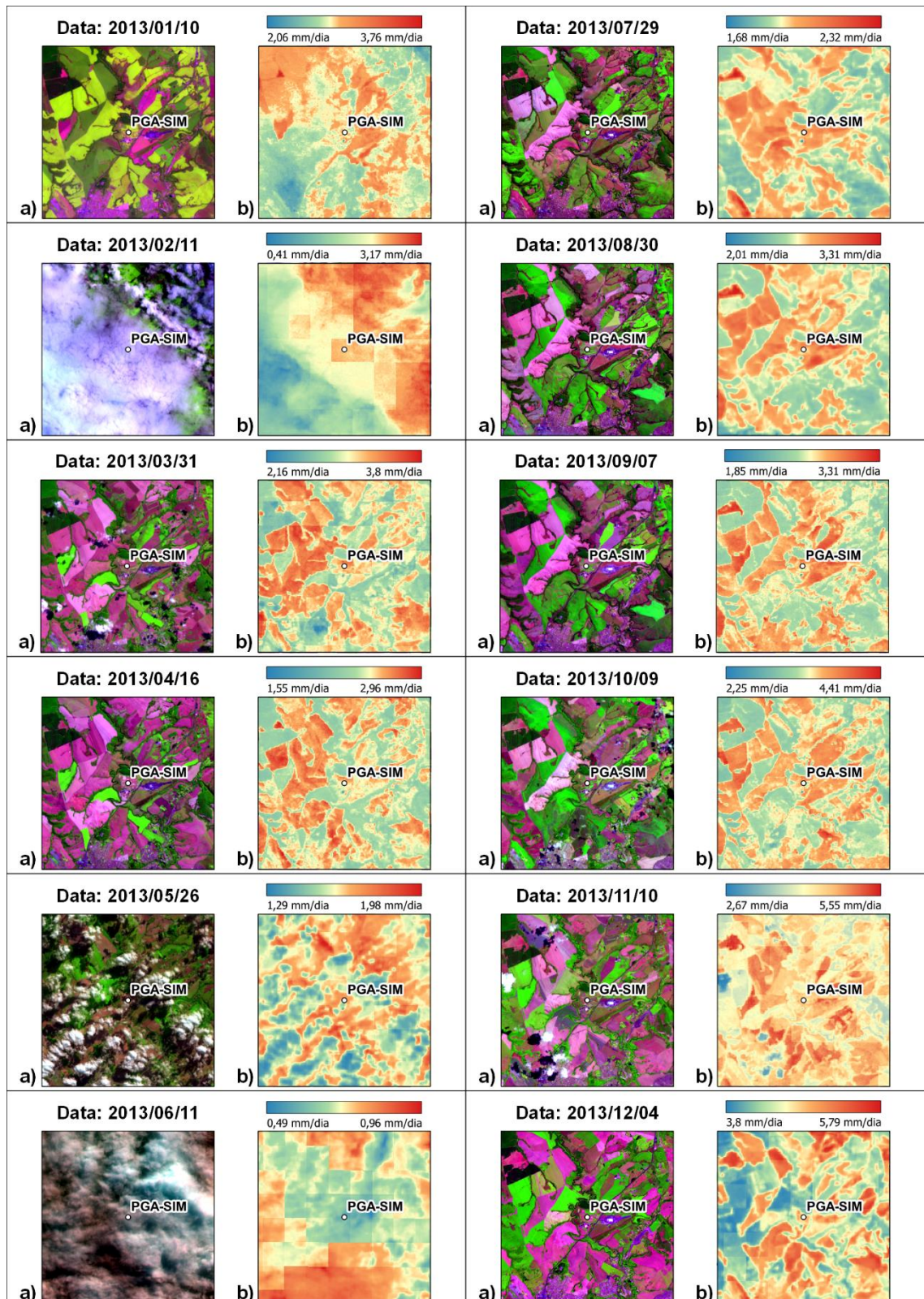
Nos dois climas analisados, observou-se que a $ET_{O_{MJS}(\psi_{ar};Ra)}$ (FIGURAS 3.3 e 3.4) nos meses do verão e primavera foram maiores do que no outono e inverno na BHRT, o mesmo padrão observado na análise espacial (FIGURA 3.2 e TABELA 3.4).

FIGURA 3.3 – MELHORES IMAGENS DO SATÉLITE LANDSAT 7 E 8 NO ANO DE 2013 (CENÁRIO NORMAL), PARA COMPOR O BANCO DE DADOS DE ENTRADA PARA A INTERPOLAÇÃO TEMPORAL NO CLIMA Cfa , E LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO IAPAR DE LONDRINA (LDA-IPR), SENDO: a) COMPOSIÇÃO COLORIDA FALSA COR, PARA VISUALIZAÇÃO DA COBERTURA DE NUVENS; E b) IMAGEM COM VALORES DE $ET_{oMJS}(\psi_{ar};Ra)$ ($mm\ dia^{-1}$) ESTIMADA COM DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO.



FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 3.4 – MELHORES IMAGENS DO SATÉLITE LANDSAT 7 E 8 NO ANO DE 2013 (CENÁRIO NORMAL), PARA COMPOR O BANCO DE DADOS DE ENTRADA PARA A INTERPOLAÇÃO TEMPORAL NO CLIMA Cfb , E LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO IAPAR DE PONTA GROSSA (PGA-SIM), SENDO: a) COMPOSIÇÃO COLORIDA FALSA COR, PARA VISUALIZAÇÃO DA COBERTURA DE NUVENS; E b) IMAGEM COM VALORES DE $ET_{OMJS}(\psi_{ar};Ra)$ (mm dia⁻¹) ESTIMADA COM DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO.



FONTE: O Autor (2021)

Gao et al. (2006) desenvolveram um algoritmo unindo qualidades do satélite Landsat (resolução espacial de 30 metros) e do sensor MODIS (resolução temporal diária) abordo do satélite Aqua/Terra. No algoritmo, que consiste em um modelo de fusão de reflectância adaptativa espacial e temporal (STARFM) aplicado as imagens Landsat e MODIS, é necessário realizar a calibração e correção atmosférica para reflectância de superfície das imagens. O motivo deveu-se às diferenças de processamento dos dados, tempo de aquisição, largura da banda, erros de geolocalização e resolução espacial. Os autores destacaram os seguintes fatores que dificultaram a fusão das imagens: *i)* A observação não homogênea do MODIS, pois pode incluir tipos mistos de cobertura do solo, considerando a resolução espacial do Landsat; *ii)* A cobertura do solo e erro de geolocalização do pixel pode mudar durante o período de previsão; e *iii)* A variação fenológica da vegetação e geometria solar alteram a reflectância da imagem, da data de entrada para a data de saída.

Os problemas relatados por Gao et al. (2006) e complexidade de execução do algoritmo STARFM, foram os motivos que levaram à proposição e utilização de um interpolador temporal simplificado no presente trabalho. O algoritmo “*r.series.interp*” do Qgis tem a vantagem de ser uma ferramenta disponível no SIG, e que pode ser utilizada apenas no satélite de melhor resolução espacial (Landsat) para interpolar o período desejado pelo usuário, sem a necessidade de diversas transformações para chegar ao produto final. Além disso, no levantamento bibliográfico realizado, não foram constatados trabalhos científicos que testassem a eficiência do “*r.series.interp*”. No entanto, o algoritmo do Qgis disponibiliza apenas o método de interpolação linear, o que limitou a utilização e estimativa da $ET_{O_{MJS}(\psi_{ar};Ra)_{int}}$ diária, que não conseguiu acompanhar convenientemente a variação da $ET_{O_{PM}}$ (FIGURA 3.5).

Uma das vantagens do *software* Qgis consiste na possibilidade de criar rotinas em linguagem de programação Python (Rogers e Staub, 2013). Assim, com o conhecimento adequado em programação é possível reproduzir o algoritmo com outros métodos de interpolação mais robustos que o linear. A utilização do Python é muito útil para automatização de rotinas, principalmente as voltadas para utilização/geração de dados espacializados. Radočaj et al. (2020) desenvolveu um método automatizado de delineamento de zonas de textura adequado para o cultivo

da soja, otimizando análises de aptidão agrícola. Chen et al. (2021) constituíram o PyLUSAT, um conjunto de ferramentas para análise de uso adequado do solo desenvolvida em Python, possíveis de serem utilizadas em sistemas de informação geográficas, como ArcMap e Qgis. Embora o algoritmo “*r.series.interp*” tenha limitações, é possível serem superadas com aprimoramento de rotinas desenvolvidas com programação Python em *softwares* como Qgis.

3.5.3 Validação das estimativas da $ET_{oMJS(\psi_{ar};Ra)_{int}}$

O monitoramento contínuo de alta resolução espacial e temporal da evapotranspiração é essencial para melhorar a gestão de recursos hídricos, principalmente o manejo de irrigação. No entanto, os satélites disponíveis atualmente não possuem mecanismos para integrar altas resoluções espaciais e temporais em um único sensor (Emelyanova et al., 2013, Wang et al., 2019). Devido às limitações, muitas fusões espaciais e temporais têm sido desenvolvidas (Zhang et al., 2015), visando extrair as melhores informações de cada sensor. Os satélites Landsat e MODIS são as plataformas mais utilizadas para a fusão de dados. Os principais motivos são: O Landsat possui resolução espacial moderadamente alta e o MODIS resolução temporal diária (Yang et al., 2016; Weng et al., 2014; Januar et al., 2020); As imagens são gratuitas e o acervo disponibilizado é grande o suficiente para estudos temporais. A facilidade de acesso às imagens Landsat e MODIS possibilita que os órgãos públicos melhorem, com custo baixo, o gerenciamento dos recursos hídricos em grandes áreas, como bacias hidrográficas.

A utilização dos dados MODIS para estimativa da ET_o diária vem sendo estudada à alguns anos (Ruhoff et al., 2012; Autovino et al., 2016; Mu et al., 2007). Paredes et al. (2021) estimando a ET_o diária com dados remotos do satélite geoestacionário Meteosat de segunda geração (disponível para países europeus), conseguiram resultados excelentes ($r > 0,98$ e $RMSE = 0,13 \text{ mm dia}^{-1}$). A limitação dos dados de evapotranspiração espacializados com o sensor MODIS e satélite Meteosat está na resolução espacial, em torno de 1 km e 4 km, respectivamente. A baixa resolução espacial limita a utilização da evapotranspiração em escala local. Melhores resoluções podem fornecer informações detalhadas sobre o uso da água

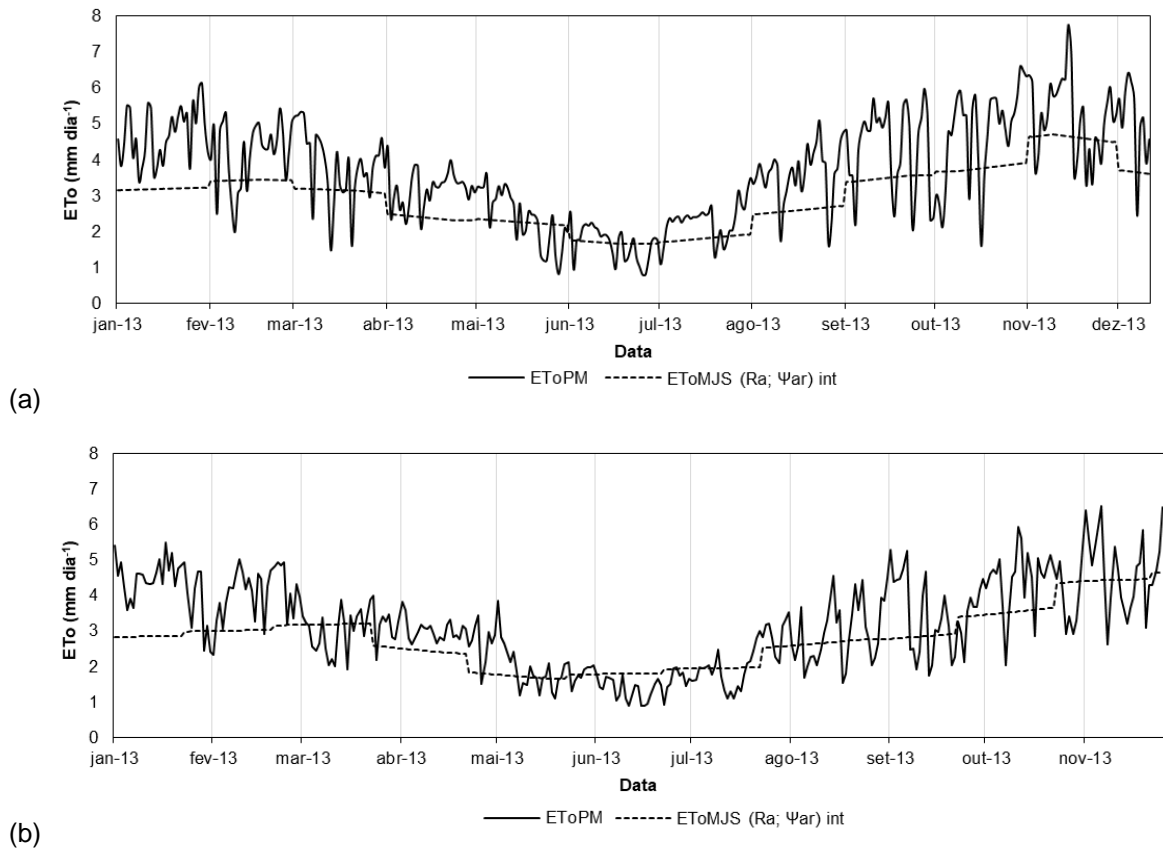
em culturas e estado da umidade do solo, permitindo a otimização da eficiência de irrigação em pequenas propriedades (Ke et al., 2017).

Muitos estudos também estão sendo desenvolvidos tentando a união de dados MODIS e Landsat (Li et al., 2017; Yi et al., 2018; Cammalleri et al., 2014), com a finalidade de estimar diariamente imagens de ET_o com 30 m de resolução. Entretanto, em sua maioria, os trabalhos desenvolvidos possuem certa dificuldade para reprodução da metodologia. Diante da complexidade encontrada nas metodologias existentes, o presente trabalho propôs testar a qualidade do algoritmo de interpolação temporal do software Qgis, que utilizou apenas as imagens Landsat para realizar a estimativa temporal.

A variação temporal da $ET_{o_{PM}}$ para os tipos climáticos *Cfa* e *Cfb* foi maior que a estimativa da $ET_{o_{MJS(\psi_{ar};Ra)_{int}}}$ (FIGURA 3.5a e 3.5b), utilizando o interpolador temporal testado no presente estudo. A evapotranspiração estimada com o método Penman-Monteith ($ET_{o_{PM}}$) tem a vantagem de combinar de forma não linear as principais variáveis (temperatura, umidade relativa, radiação e velocidade do vento) que atuam no processo, além de ter como base a entrada de variáveis medidas todos os dias. Por outro lado, considera-se que a estimativa temporal da $ET_{o_{MJS(\psi_{ar};Ra)_{int}}}$ com apenas 12 e 10 imagens para os climas *Cfa* e *Cfb*, respectivamente, é uma amostra relativamente pequena para alimentar o interpolador temporal para gerar valores diários de evapotranspiração ao longo do ano.

Cabe ressaltar, que a função interpoladora do algoritmo “*r.series.interp*” é linear (a única disponível), o que explica a existência de linearidade entre um mês e outro (FIGURA 3.5). Logo, mesmo antes de realizar as análises já se esperava que o algoritmo não fosse capaz de representar a variabilidade da $ET_{o_{PM}}$, devido à simplicidade da interpolação. Contudo, estas ferramentas têm rápido desenvolvimento, e se o algoritmo disponibilizar interpoladores mais robustos (polinomial), os desempenhos nas estimativas poderão ser sensivelmente melhorados, visto que a tendência temporal da $ET_{o_{PM}}$ possui forma senoidal.

FIGURA 3.5 – SÉRIE TEMPORAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA CALCULADA COM OS MODELOS PENMAN-MONTEITH ASCE (ET_{oPM}) E MORETTI-JERSZURKI-SILVA INTERPOLADO TEMPORALMENTE ($ET_{oMJS(\psi_{ar};Ra)_{int}}$), SENDO: a) ESTAÇÃO LDA-IPR, CLIMA *Cfa*; E b) ESTAÇÃO PGA-SIM, CLIMA *Cfb*.

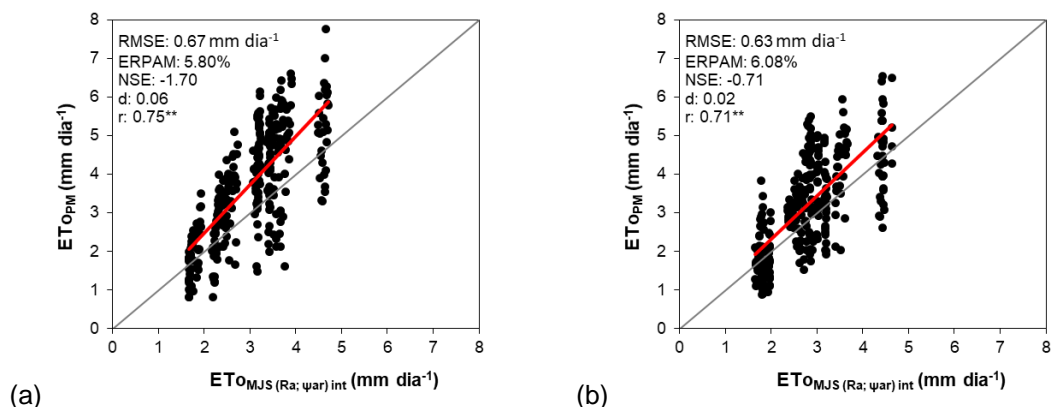


FONTE: O Autor (2021)

Mesmo utilizando um interpolador linear, a tendência da evapotranspiração interpolada ($ET_{oMJS(\psi_{ar};Ra)_{int}}$) foi semelhante a ET_{oPM} (FIGURA 3.5), o que indicou resultado extremamente interessante para ser utilizado em atividades voltadas ao planejamento de grandes áreas, contendo poucos dados meteorológicos disponíveis. Além disso, com a tendência do avanço tecnológico, em um futuro próximo será possível à obtenção de imagens de satélites com alta resolução temporal e espacial, em apenas uma plataforma, apresentando detalhes com menor tempo de revisita para o mesmo ponto de referência. Um menor período entre imagens de satélite permitiria melhorar as estimativas da $ET_{oMJS(\psi_{ar};Ra)_{int}}$, acompanhando melhor a tendência e variabilidade da ET_{oPM} . Bem como, maior detalhamento possibilitaria estudos em escala local e de bacia, com maior precisão em análise espacial da $ET_{oMJS(\psi_{ar};Ra)_{int}}$.

Li et al. (2017), utilizando o algoritmo STARFM, fez a fusão dos dados do sensor MODIS (resolução temporal diária) e do Satélite ASTER (resolução espacial 90 metros) para obter dados remotos diários. As informações serviram de entrada para realizar a estimativa ET_o espacializada (com modelo Surface Energy Balance System – SEBS), que comparada à ET_o medida em equipamentos locais obtiveram estimativas temporais com $RMSE = 0,88 \text{ mm dia}^{-1}$. Yi et al. (2018) com a mesma metodologia, obtiveram $RMSE = 0,80 \text{ mm dia}^{-1}$ e $ERPAM\% = 13,40\%$. Cammalleri et al. (2014) utilizando o mesmo algoritmo com dados MODIS e Landsat obtiveram $RMSE = 1,32 \text{ mm dia}^{-1}$ e $ERPAM\% = 24,95\%$. Comparando com a literatura, os resultados encontrados no presente trabalho (FIGURA 3.6) com os indicadores r , $RMSE$ e $ERPAM\%$ apresentaram melhor desempenho. Entretanto, NSE e d indicaram pior desempenho na estimativa temporal. Desta forma, considera-se que a $ET_{oMJS(\psi_{ar};Ra)_{int}}$ pode ser estimada apenas com precisão aceitável. Os valores $ET_{oMJS(\psi_{ar};Ra)_{int}}$ acompanharam em média a tendência ET_{oPM} , mas a distancia ou amplitude de valores pontuais pode se apresentar bem discrepante (FIGURA 3.5 e 3.6).

FIGURA 3.6 – ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR, ERROS, ÍNDICE E COEFICIENTE OBTIDOS ENTRE OS RESPECTIVOS VALORES DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA, CALCULADAS COM OS MODELOS PENMAN-MONTEITH ASCE (ET_{oPM} ; UTILIZANDO DADOS MEDIDOS EM ESTAÇÕES) E MORETTI-JERSZURKI-SILVA ($ET_{oMJS(\psi_{ar};Ra)_{int}}$; UTILIZANDO DADOS OBTIDOS POR SENSORIAMENTO REMOTO E INTERPOLADO TEMPORALMENTE), SENDO: a) ESTAÇÃO LDA-IPR, CLIMA *Cfa*; b) ESTAÇÃO PGA-SIM, CLIMA *Cfb*.



FONTE: O Autor (2020)

3.6 CONCLUSÕES

- A evapotranspiração espacializada permitiu identificar diferenças na mesma estação do ano nos cenários climáticos analisados.
- A metodologia desenvolvida para estimar a $ET_{o_{MJS}(\psi_{ar};Ra)}$ espacializada em grandes áreas tem precisão estatística aceitável, mas o processo para constituir o mosaico final para área de grande cobertura, como na BHRT, ainda mostrou-se bem laborioso.
- A estimativa temporal da evapotranspiração tem precisão estatística satisfatória. O número de imagens viáveis e o algoritmo interpolador linear limitou o acompanhamento das variações da $ET_{o_{PM}}$ diária ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDRIS, S.; KERKIDES, P. New empirical formula for hourly estimations of reference evapotranspiration. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 60, n. 3, p. 157-180, maio 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0378-3774\(02\)00172-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0378-3774(02)00172-5).
- ALLEN, R. G. **REF-ET: reference evapotranspiration calculation software**. For FAO and ASCE standardized equations. University of Idaho: Copyright, 2000. 82 p. (Version 2.0 for Windows).
- ALLEN, R. G.; PRUITT, W. O.; WRIGHT, J. L.; HOWELL, T. A.; VENTURA, F.; SNYDER, R.; ITENFISU, D.; STEDUTO, P.; BERENGENA, J.; YRISARRY, J. B. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 81, n. 1-2, p. 1-22, mar. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2005.03.007>.
- 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**, Asce, v. 133, n. 4, p. 380-394, jul. 2007.
- ALLEN, R.; IRMAK, A.; TREZZA, R.; HENDRICKX, J. M. H.; BASTIAANSEN, W.; KJAERGAARD, J. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. **Hydrological Processes**, [S.L.], v. 25, n. 26, p. 4011-4027, 22 dez. 2011. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.8408>.
- ALTHOFF, D.; ALVINO, F. C. G.; FILGUEIRAS, R.; ALEMAN, C. C.; CUNHA, F. F. Evapotranspiration for irrigated agriculture using orbital satellites. **Bioscience Journal**, [S.L.], p. 670-678, 2019. EDUFU - Editora da Universidade Federal de Uberlândia. <http://dx.doi.org/10.14393/bj-v35n3a2019-41737>.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [S.L.], v. 22, n. 6, p. 711-728, 1 dez. 2013. Schweizerbart. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

ANA (Agência Nacional de Águas). **Estimativas de evapotranspiração real por sensoriamento remoto no Brasil**. 4. ed. Brasília: Ana, 2020. 23 p.

ASCE-EWRI (New York). American Society of Civil Engineers. **The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation**. New York: American Society of Civil Engineers, 2005. 70 p. Task Committee Report.

AUTOVINO, D.; MINACAPILLI, M.; PROVENZANO, G. Modelling bulk surface resistance by MODIS data and assessment of MOD16A2 evapotranspiration product in an irrigation district of Southern Italy. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 167, p. 86-94, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2016.01.006>.

BAI, B.; TAN, Y.; DONCHYTS, G.; HAAG, A.; WEERTS, A. A Simple Spatio-Temporal Data Fusion Method Based on Linear Regression Coefficient Compensation. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 12, n. 23, p. 3900, 28 nov. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12233900>.

BAKHTIARI, B.; MOGHADAS, R. Kamyab; KHANJANI, M. J.; TARAZ, H. Kerman weighing electronic lysimeter error analysis. **Sustainable Irrigation Management, Technologies and Policies**, [S.L.], v. 96, n. 1, p. 137-147, 23 ago. 2006. WIT Press. <http://dx.doi.org/10.2495/si060141>.

BENLI, B.; KODAL, S.; ILBEYI, A.; USTUN, H. Determination of evapotranspiration and basal crop coefficient of alfalfa with a weighing lysimeter. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 81, n. 3, p. 358-370, mar. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2005.05.003>.

BOEIRA, L. S.; BÁRBARA NETO, M.; NEVES, L. A.; TERRA, V. S. S.; COLLARES, G. L. Evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith em anos de enos para microrregião de Pelotas-RS. **Irriga**, [S.L.], v. 25, n. 3, p. 537-548, 28 set. 2020. Brazilian Journal of Irrigation and Drainage - IRRIGA. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2020v25n3p537-548>.

BOGGIONE, G. A.; FONSECA, L. M. G. Restoration of Landsat-7 Images. **National Institute For Space Research**, São José dos Campos, 2004. Disponível em: <<http://urlib.net/rep/sid.inpe.br/jeferson/2004/01.13.13.12>>.

CAMMALLERI, C.; ANDERSON, M. C.; GAO, F.; HAIN, C. R.; KUSTAS, W. P. A data fusion approach for mapping daily evapotranspiration at field scale. **Water Resources Research**, [S.L.], v. 49, n. 8, p. 4672-4686, ago. 2013. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1002/wrcr.20349>.

CAMMALLERI, C.; ANDERSON, M. C.; GAO, F.; HAIN, C. R.; KUSTAS, W. P. Mapping daily evapotranspiration at field scales over rainfed and irrigated agricultural areas using remote sensing data fusion. **Agricultural and Forest Meteorology**, [S.L.], v. 186, p. 1-11, mar. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.11.001>.

CAVALCANTI, I. F. A.; CARRIL, A. F.; PENALBA, O. C.; GRIMM, A. M.; MENÉNDEZ, C. G.; SANCHEZ, E.; CHERCHI, A.; SÖRENSON, A.; ROBLEDO, F.; RIVERA, J. Precipitation extremes over La Plata Basin – Review and new results from observations and climate simulations. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 523, p. 211-230, abr. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.028>.

CHEN, C.; JUDGE, J.; HULSE, D. **PYLUSAT: An open-source Python toolkit for GIS-based land use suitability analysis**. 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2107.01674.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2021.

CHIEW, F. H. S.; KAMALADASA, N. N.; MALANO, H. M.; MCMAHON, T. A. Penman-Monteith, FAO-24 reference crop evapotranspiration and class-A pan data in Australia. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 9-21, ago. 1995. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-3774\(95\)01172-f](http://dx.doi.org/10.1016/0378-3774(95)01172-f).

CUNHA, G. R.; PIRES, J. L. F.; DALMAGO, G. A.; SANTI, A.; PASINATO, A.; SILVA, A. A. G.; ASSAD, E. D.; ROSA, C. M. El Niño/La Niña - Oscilação Sul e seus impactos na agricultura brasileira: fatos, especulações e aplicações. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 1, n. 121, p. 18-22, jan. 2011. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/914645>.

DELGADO, R. C.; SOUZA, L. P.; PEREIRA, M. G.; ALMEIDA, C. T.; RODRIGUES, R. Á. Orbital and surface evapotranspiration compared to fao-56 standard in state of Acre. **Irriga**, [S.L.], v. 22, n. 3, p. 547-559, 28 ago. 2017. Brazilian Journal of Irrigation and Drainage - IRRIGA. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2017v22n3p547-559>.

EMELYANOVA, I. V.; MCVICAR, T. R.; VAN NIEL, T. G.; LI, L. T.; VAN DIJK, A. I. J. M. Assessing the accuracy of blending Landsat–MODIS surface reflectances in two landscapes with contrasting spatial and temporal dynamics: a framework for algorithm selection. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 133, p. 193-209, jun. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.007>.

FAN, J.; MENG, J.; ASHKENAZY, Y.; HAVLIN, S.; SCHELLNHUBER, H. J. Network analysis reveals strongly localized impacts of El Niño. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [S.L.], v. 114, n. 29, p. 7543-7548, 3 jul. 2017. Proceedings of the National Academy of Sciences. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1701214114>.

FILGUEIRAS, R.; MANTOVANI, E. C.; FERNANDES-FILHO, E. I.; CUNHA, F. F.; ALTHOFF, D.; DIAS, S. H. B. Fusion of MODIS and Landsat-Like Images for Daily High Spatial Resolution NDVI. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 12, n. 8, p. 1297, 20 abr. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12081297>.

GAO, F.; MASEK, J.; SCHWALLER, M.; HALL, F. On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: predicting daily landsat surface reflectance. **Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, [S.L.], v. 44, n. 8, p. 2207-2218, ago. 2006. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tgrs.2006.872081>.

GGWS, Golden Gate Weather Services. **El Niño and La Niña Years and Intensities**. 2021. Disponível em: <https://ggweather.com/enso/oni.htm>. Acesso em: 22 maio 2021.

GIBSON, L. A. et al. Review: Estimating evapotranspiration using remote sensing and the Surface Energy Balance System – A South African perspective. **Water Sa**, [S.L.], v. 39, n. 4, p.477-484, 10 jul. 2013. Academy of Science of South Africa. <http://dx.doi.org/10.4314/wsa.v39i4.5>.

GLENN, E. P.; NAGLER, P. L.; HUETE, A. R. Vegetation Index Methods for Estimating Evapotranspiration by Remote Sensing. **Surveys in Geophysics**, [S.L.], v. 31, n. 6, p. 531-555, 17 out. 2010. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10712-010-9102-2>.

HEIMHUBER, V.; TULBURE, M. G.; BROICH, M. Addressing spatio-temporal resolution constraints in Landsat and MODIS-based mapping of large-scale floodplain inundation dynamics. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 211, p. 307-320, jun. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.016>.

HERMAN, M. R.; NEJADHASHEMI, A. P.; ABOUALI, M.; HERNANDEZ-SUAREZ, J. S.; DANESHVAR, F.; ZHANG, Z.; ANDERSON, M. C.; SADEGHI, A. M.; HAIN, C. R.; SHARIFI, A. Evaluating the role of evapotranspiration remote sensing data in improving hydrological modeling predictability. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 556, p. 39-49, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.009>.

JANUAR, T. W.; LIN, T.; HUANG, C.; CHANG, K. Modifying an Image Fusion Approach for High Spatiotemporal LST Retrieval in Surface Dryness and Evapotranspiration Estimations. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 12, n. 3, p. 498, 4 fev. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12030498>.

JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M.; SILVA, L. C. R. Expanding the geography of evapotranspiration: an improved method to quantify land-to-air water fluxes in tropical and subtropical regions. **PLOS ONE**, [S.L.], v. 12, n. 6, p. 1-20, 28 jun. 2017. Public Library of Science (PLOS). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0180055>.

JING, W.; YASEEN, Z. M.; SHAHID, S.; SAGGI, M. K.; TAO, H.; KISI, O.; SALIH, S. Q.; AL-ANSARI, N.; CHAU, K. Implementation of evolutionary computing models for reference evapotranspiration modeling: short review, assessment and possible future research directions. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 811-823, 1 jan. 2019. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/19942060.2019.1645045>.

KARIMI, P.; BASTIAANSEN, W. G. M.; MOLDEN, D.; CHEEMA, M. J. M. Basin-wide water accounting based on remote sensing data: an application for the indus basin. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S.L.], v. 17, n. 7, p. 2473-2486, 4 jul. 2013. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-17-2473-2013>.

KE, Y.; IM, J.; PARK, S.; GONG, H. Spatiotemporal downscaling approaches for monitoring 8-day 30 m actual evapotranspiration. **Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [S.L.], v. 126, p. 79-93, abr. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.02.006>.

LI, Y.; HUANG, C.; HOU, J.; GU, J.; ZHU, G.; LI, X. Mapping daily evapotranspiration based on spatiotemporal fusion of ASTER and MODIS images over irrigated agricultural areas in the Heihe River Basin, Northwest China. **Agricultural and Forest Meteorology**, [S.L.], v. 244-245, p. 82-97, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.05.023>.

LÓPEZ-URREA, R.; OLALLA, F. Martín de Santa; FABEIRO, C.; MORATALLA, A. An evaluation of two hourly reference evapotranspiration equations for semiarid conditions. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 86, n. 3, p. 277-282, dez. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2006.05.017>.

MA, Z.; YAN, N.; WU, B.; STEIN, A.; ZHU, W.; ZENG, H. Variation in actual evapotranspiration following changes in climate and vegetation cover during an ecological restoration period (2000–2015) in the Loess Plateau, China. **Science of the Total Environment**, [S.L.], v. 689, p. 534-545, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.155>.

MATZENAUER, R.; BERLATO, M. A.; SAMPAIO, M. R.; TRINDADE, J. K. Efeitos do fenômeno Enos sobre a evapotranspiração de referência na região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul, Brasil. **Pesq. Agrop. Gaúcha**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 67-70, 15 maio 2008.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Bahia: Cnpq, 2012. 276 p.

MEZA, F. J. Variability of reference evapotranspiration and water demands. Association to ENSO in the Maipo river basin, Chile. **Global and Planetary Change**, [S.L.], v. 47, n. 2-4, p. 212-220, jul. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.10.013>.

MOURA, C. R. W.; ZOLNIER, S.; RIBEIRO, A.; OLIVEIRA, R. A. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração horária para alface cultivada em sistema hidropônico em ambiente protegido. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 30, n. 4, p. 646-656, ago. 2010. FapUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-69162010000400009>.

MU, Q.; HEINSCH, F. A.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 111, n. 4, p. 519-536, dez. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2007.04.015>.

MUTIIBWA, D.; STRACHAN, S.; ALBRIGHT, T. Land Surface Temperature and Surface Air Temperature in Complex Terrain. **Journal of Selected Topics In Applied Earth Observations and Remote Sensing**, [S.L.], v. 8, n. 10, p. 4762-4774, out. 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/jstars.2015.2468594>.

OLIVEIRA, L. M. M.; LIMA, M. S. M. G.; SILVA, B. B.; MOURA, A. E. S. S. Balanço de radiação por sensoriamento remoto em bacia hidrográfica da zona da mata nordestina. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S.L.], v. 30, n. 1, p. 16-28, mar. 2015. FapUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620130652>.

PAREDES, P.; TRIGO, I.; BRUIN, H.; SIMÕES, N.; PEREIRA, L. S. Daily grass reference evapotranspiration with Meteosat Second Generation shortwave radiation and reference ET products. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 248, p. 106543, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106543>.

PAULA, A. C. P.; SILVA, C. L.; RODRIGUES, L. N.; SCHERER-WARREN, M. Performance of the SSEBop model in the estimation of the actual evapotranspiration of soybean and bean crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 54, p. 1-11, 2019. FapUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-3921.pab2019.v54.00739>.

RADOČAJ, D.; JURIŠIĆ, M.; ZEBEC, V.; PLAČČAK, I. Delineation of Soil Texture Suitability Zones for Soybean Cultivation: a case study in continental Croatia. **Agronomy**, [S.L.], v. 10, n. 6, p. 823, 10 jun. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy10060823>.

ROGERS, S. R.; STAUB, B. Standard use of Geographic Information System (GIS) techniques in honey bee research. **Journal of Apicultural Research**, [S.L.], v. 52, n. 4, p. 1-48, jan. 2013. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.3896/ibra.1.52.4.08>.

ROY, D. P.; WULDER, M. A.; LOVELAND, T. R.; WOODCOCK, C. E.; ALLEN, R. G.; ANDERSON, M. C.; HELDER, D.; IRONS, J. R.; JOHNSON, D. M.; KENNEDY, R. Landsat-8: science and product vision for terrestrial global change research. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 145, p. 154-172, abr. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>.

RUHOFF, A. L.; PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; ARAGAO, L. E. O. C.; ROCHA, H. R.; MALHI, Y. S. A MODIS-Based Energy Balance to Estimate Evapotranspiration for Clear-Sky Days in Brazilian Tropical Savannas. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 4, n. 3, p. 703-725, 12 mar. 2012. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs4030703>.

SADO, R.; WARREN, M.; ROIG, H. Estimativa de irrigação por meio de sensoriamento remoto na bacia hidrográfica do Alto São Marcos. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S.L.], v. 70, n. 3, p. 787-802, 30 set. 2018. EDUFU - Editora da Universidade Federal de Uberlândia. <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv70n3-45700>.

SANTOS, A. A. **Evapotranspiração de referência horária e diária para o Estado do Paraná**. Curitiba, 2020. 214p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

SENAY, G. B.; FRIEDRICH, M.; SINGH, R. K.; VELPURI, N. M. Evaluating Landsat 8 evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River Basin. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 185, p. 171-185, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.043>.

SHAH, S. B.; EDLING, R. J. Daily evapotranspiration prediction from Louisiana flooded rice field. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [S.L.], v. 126, n. 1, p.8-13, fev. 2000.

SOUZA, J. L. M. **Fundamentos de matemática e estatística para formulação de modelos e análise de dados: aplicado às ciências agrárias**. Curitiba, Plataforma Moretti/DSEA/SCA/UFPR, 2018. (Manual didático)

STRECK, N. A.; ROSA, H. T.; WALTER, L. C.; BOSCO, L. C.; LAGO, I.; HELDWEIN, A. B. O fenômeno El Niño Oscilação Sul e a variabilidade interanual da evaporação do tanque Classe A e da umidade relativa do ar em Santa Maria, RS. **Ciência Rural**, [S.L.], v. 38, n. 5, p. 1452-1455, ago. 2008. FapUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84782008000500041>.

SYPERRECK, V. L. G. et al. Avaliação de desempenho de métodos para estimativas de evapotranspiração de referência para a região. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 30, n. 5, p.603-609, 2008. Redalyc. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303026583001>>. Acesso em: 21 set. 2019.

TALSMA, C. J.; GOOD, S. P.; JIMENEZ, C.; MARTENS, B.; FISHER, J. B.; MIRALLES, D. G.; MCCABE, M. F.; PURDY, A. J. Partitioning of evapotranspiration in remote sensing-based models. **Agricultural and Forest Meteorology**, [S.L.], v. 260-261, p. 131-143, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.05.010>.

TYAGI, N. K; SHARMA, D. K; LUTHRA, S. K. Determination of evapotranspiration and crop coefficients of rice and sunflower with lysimeter. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 45, n. 1, p. 41-54, jun. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0378-3774\(99\)00071-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0378-3774(99)00071-2).

VENANCIO, L. P.; EUGENIO, F. C.; FILGUEIRAS, R.; CUNHA, F. F.; SANTOS, R. A.; RIBEIRO, W. R.; MANTOVANI, E. C. Mapping within-field variability of soybean evapotranspiration and crop coefficient using the Earth Engine Evaporation Flux (EEFlux) application. **PLOS ONE**, [S.L.], v. 15, n. 7, p. 1-20, 9 jul. 2020. Public Library of Science (PLOS). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0235620>.

WANG, T.; TANG, R.; LI, Z.; JIANG, Y.; LIU, M.; NIU, L. An Improved Spatio-Temporal Adaptive Data Fusion Algorithm for Evapotranspiration Mapping. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 11, n. 7, p. 761, 29 mar. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs11070761>.

WENG, Q.; FU, P.; GAO, F. Generating daily land surface temperature at Landsat resolution by fusing Landsat and MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 145, p. 55-67, abr. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.003>.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the Evaluation and Comparison of Models. **Journal of Geophysical Research**, [s.l.], v. 90, n. 5, p.8995-9005, 20 set. 1985. Paper number 5C0173. 0148-0227/85/005C-0173505.00.

YANG, G.; WENG, Q.; PU, R.; GAO, F.; SUN, C.; LI, H.; ZHAO, C. Evaluation of ASTER-Like Daily Land Surface Temperature by Fusing ASTER and MODIS Data during the HiWATER-MUSOEXE. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 75, 21 jan. 2016. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs8010075>.

YANG, Y.; ANDERSON, M. C.; GAO, F.; HAIN, C. R.; SEMMENS, K. A.; KUSTAS, W. P.; NOORMETS, A.; WYNNE, R. H.; THOMAS, V. A.; SUN, G. Daily Landsat-scale evapotranspiration estimation over a forested landscape in North Carolina, USA, using multi-satellite data fusion. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S.L.], v. 21, n. 2, p. 1017-1037, 17 fev. 2017. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-21-1017-2017>.

YI, Z.; ZHAO, H.; JIANG, Y. Continuous Daily Evapotranspiration Estimation at the Field-Scale over Heterogeneous Agricultural Areas by Fusing ASTER and MODIS Data. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 10, n. 11, p. 1694, 26 out. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs10111694>.

ZHANG, H. K.; HUANG, B.; ZHANG, M.; CAO, K.; YU, L. A generalization of spatial and temporal fusion methods for remotely sensed surface parameters. **International Journal of Remote Sensing**, [S.L.], v. 36, n. 17, p. 4411-4445, 2 set. 2015. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2015.1083633>.

ZHU, X.; CHEN, J.; GAO, F.; CHEN, X.; MASEK, J. G. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 114, n. 11, p. 2610-2623, nov. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2010.05.032>.

4 CONCLUSÕES GERAIS

- Variáveis espaciais T_s e Wp provenientes de imagens de satélite (Landsat 8 e Aqua MODIS) podem estimar adequadamente a média da temperatura ($T_{m_{EM}}$) e umidade relativa ($UR_{m_{EM}}$) do ar medidos em estações meteorológicas. Modelos lineares múltiplos apresentam desempenho satisfatório para estimar a temperatura ($T_{e_{SR}(Wp;Ts)}$) e umidade relativa ($UR_{e_{SR}(Wp;Ts)}$).
- O modelo Moretti-Jerszurki-Silva ($ET_{o_{MJS}(Ra; \psi_{ar})}$) apresenta desempenho satisfatório e equivalente ao método de Penman-Monteith ASCE para estimar a evapotranspiração de referência, utilizando dados estimados com sensoriamento remoto. A metodologia desenvolvida para estimar a $ET_{o_{MJS}(\psi_{ar}; Ra)}$ espacializada em grandes áreas tem precisão aceitável, embora o processo seja laborioso. A evapotranspiração espacializada permitiu identificar diferenças na mesma estação do ano nos cenários climáticos analisados, o que não foi possível com a $ET_{o_{PM}}$.
- A estimativa temporal da evapotranspiração ($ET_{o_{MJS}(\psi_{ar}; Ra)_{int}}$) tem precisão estatística aceitável, mas o número de imagens viáveis e o algoritmo interpolador linear limitam o acompanhamento das variações da $ET_{o_{PM}}$ diária ao longo do tempo.

5 REFERÊNCIAS GERAIS

ABTEW, W.; TRIMBLE, P. El Niño–Southern Oscillation Link to South Florida Hydrology and Water Management Applications. **Water Resources Management**, [S.L.], v. 24, n. 15, p. 4255-4271, 5 maio 2010. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-010-9656-2>.

AHMADI, S. H.; JAVANBAKHT, Z. Assessing the physical and empirical reference evapotranspiration (ET_o) models and time series analyses of the influencing weather variables on ET_o in a semi-arid area. **Journal of Environmental Management**, [S.L.], v. 276, p. 111278, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111278>.

ALENCAR, L. P.; SEDIYAMA, G. C.; MANTOVANI, E. C. Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o padrão FAO), para Minas Gerais, na ausência de alguns dados climáticos. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 35, n. 1, p. 39-50, fev. 2015. FapUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v35n1p39-50/2015>.

ALEXANDRIS, S.; KERKIDES, P. New empirical formula for hourly estimations of reference evapotranspiration. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 60, n. 3, p. 157-180, maio 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0378-3774\(02\)00172-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0378-3774(02)00172-5).

ALLEN, R. G. **REF-ET: reference evapotranspiration calculation software**. For FAO and ASCE standardized equations. University of Idaho: Copyright, 2000. 82 p. (Version 2.0 for Windows).

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: i. factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 98, n. 6, p. 899-920, abr. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.015>.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Irrigation and Drainage, Paper 56. ed. U.S.A: Fao Irrigation and Drainage Paper, 1998. 327 p.

ALLEN, R. G.; PRUITT, W. O.; WRIGHT, J. L.; HOWELL, T. A.; VENTURA, F.; SNYDER, R.; ITENFISU, D.; STEDUTO, P.; BERENGENA, J.; YRISARRY, J. B. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ET_o by the FAO56 Penman-Monteith method. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 81, n. 1-2, p. 1-22, mar. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2005.03.007>.

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**, [S.L.], v. 133, n. 4, p. 380-394, ago. 2007. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2007)133:4(380)).

ALLEN, R.; IRMAK, A.; TREZZA, R.; HENDRICKX, J. M. H.; BASTIAANSEN, W.; KJAERGAARD, J. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and

METRIC. **Hydrological Processes**, [S.L.], v. 25, n. 26, p. 4011-4027, 22 dez. 2011. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.8408>.

ALTHOFF, D.; ALVINO, F. C. G.; FILGUEIRAS, R.; ALEMAN, C. C.; CUNHA, F. F. Evapotranspiration for irrigated agriculture using orbital satellites. **Bioscience Journal**, [S.L.], p. 670-678, 2019. EDUFU - Editora da Universidade Federal de Uberlândia. <http://dx.doi.org/10.14393/bj-v35n3a2019-41737>.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [S.L.], v. 22, n. 6, p. 711-728, 1 dez. 2013. Schweizerbart. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

ANA (Agência Nacional de Águas). **Estimativas de evapotranspiração real por sensoriamento remoto no Brasil**. 4. ed. Brasília: Ana, 2020. 23 p. CDU 556.13:528.8(81).

ANDERSON, M. C.; ALLEN, R. G.; MORSE, A.; KUSTAS, W. P. Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 122, p. 50-65, jul. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.025>.

ANDERSON, M. C.; ZOLIN, C. A.; SENTELHAS, P. C.; HAIN, C. R.; SEMMENS, K.; YILMAZ, M. T.; GAO, F.; OTKIN, J. A.; TETRAULT, R. The Evaporative Stress Index as an indicator of agricultural drought in Brazil: an assessment based on crop yield impacts. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 174, p. 82-99, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.034>.

ASCE-EWRI (New York). American Society of Civil Engineers. **The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation**. New York: American Society of Civil Engineers, 2005. 70 p. Task Committee Report.

AUTOVINO, D.; MINACAPILLI, M.; PROVENZANO, G. Modelling bulk surface resistance by MODIS data and assessment of MOD16A2 evapotranspiration product in an irrigation district of Southern Italy. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 167, p. 86-94, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2016.01.006>.

BAI, B.; TAN, Y.; DONCHYTS, G.; HAAG, A.; WEERTS, A. A Simple Spatio-Temporal Data Fusion Method Based on Linear Regression Coefficient Compensation. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 12, n. 23, p. 3900, 28 nov. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12233900>.

BAKHTIARI, B.; MOGHADAS, R. K.; KHANJANI, M. J.; TARAZ, H. Kerman weighing electronic lysimeter error analysis. **Sustainable Irrigation Management, Technologies and Policies**, [S.L.], v. 96, n. 1, p. 137-147, 23 ago. 2006. WIT Press. <http://dx.doi.org/10.2495/si060141>.

BASTIAANSEN, W. G. M.; ALI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.L.], v. 94, n. 3, p. 321-340, mar. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0167-8809\(02\)00034-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0167-8809(02)00034-8).

BENLI, B.; KODAL, S.; ILBEYI, A.; USTUN, H. Determination of evapotranspiration and basal crop coefficient of alfalfa with a weighing lysimeter. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 81, n. 3, p. 358-370, mar. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2005.05.003>.

BERTUCINI JUNIOR, J. J.; CENTENO, J. A. S. Registro de série de imagens landsat usando correlação e análise de relação espacial. **Boletim de Ciências Geodésicas**, [S.L.], v. 22, n. 4, p. 685-702, dez. 2016. FapUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1982-21702016000400039>.

BOEIRA, L. S.; BÁRBARA NETO, M.; NEVES, L. A.; TERRA, V. S. S.; COLLARES, G. L. Evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith em anos de enos para microrregião de Pelotas-RS. **Irriga**, [S.L.], v. 25, n. 3, p. 537-548, 28 set. 2020. Brazilian Journal of Irrigation and Drainage - IRRIGA. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2020v25n3p537-548>.

BOGGIONE, G. A.; FONSECA, L. M. G. Restoration of Landsat-7 Images. **National Institute For Space Research**, São José dos Campos, 2004. Disponível em: <<http://urlib.net/rep/sid.inpe.br/jeferson/2004/01.13.13.12>>.

BOMFIM, F. F.; LANSAC-TÔHA, F. M.; BONECKER, C. C.; LANSAC-TÔHA, F. A. Determinants of zooplankton functional dissimilarity during years of El Niño and La Niña in floodplain shallow lakes. **Aquatic Sciences**, [S.L.], v. 83, n. 2, p. 1-13, 26 mar. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00027-021-00796-6>.

BORBAS, E.; MENZEL, P.; GAO, B. **MODIS Atmosphere L2 Water Vapor Product**. 2017. NASA MODIS Adaptive Processing System, Goddard Space Flight Center, [doi: 10.5067 / MODIS / MOD05_L2.061]. Disponível em: <https://atmosphere-imager.gsfc.nasa.gov/products/water-vapor/doi-reference>. Acesso em: 7 jun. 2021

BUSCH, B. F. **Análise da contribuição da interceptação vegetal e da evapotranspiração em um telhado verde composto por bromélias**. Projeto de Graduação (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

CAMARGO, A. P. **Balanço hídrico no Estado de São Paulo**. 3.ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1971. 24p. (Boletim,116)

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 13 maio 1997. ISSN 0104-1347.

CAMMALLERI, C.; ANDERSON, M. C.; GAO, F.; HAIN, C. R.; KUSTAS, W. P. A data fusion approach for mapping daily evapotranspiration at field scale. **Water Resources Research**, [S.L.], v. 49, n. 8, p. 4672-4686, ago. 2013. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1002/wrcr.20349>.

CAMMALLERI, C.; ANDERSON, M. C.; GAO, F.; HAIN, C. R.; KUSTAS, W. P. Mapping daily evapotranspiration at field scales over rainfed and irrigated agricultural areas using remote sensing data fusion. **Agricultural and Forest Meteorology**,

[S.L.], v. 186, p. 1-11, mar. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.11.001>.

CAVALCANTI, I. F. A.; CARRIL, A. F.; PENALBA, O. C.; GRIMM, A. M.; MENÉNDEZ, C. G.; SANCHEZ, E.; CHERCHI, A.; SÖRENSSON, A.; ROBLEDO, F.; RIVERA, J. Precipitation extremes over La Plata Basin – Review and new results from observations and climate simulations. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 523, p. 211-230, abr. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.028>.

CHEN, C.; JUDGE, J.; HULSE, D. **PYLUSAT: An open-source Python toolkit for GIS-based land use suitability analysis**. 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2107.01674.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2021.

CHEN, D.; GAO, G.; XU, C.; GUO, J.; REN, G. Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China. **Climate Research**, [S.L.], n. 28, p. 123-132, 16 mar. 2005.

CHIEW, F. H. S.; KAMALADASA, N. N.; MALANO, H. M.; MCMAHON, T. A. Penman-Monteith, FAO-24 reference crop evapotranspiration and class-A pan data in Australia. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 9-21, ago. 1995. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-3774\(95\)01172-f](http://dx.doi.org/10.1016/0378-3774(95)01172-f).

CHOUDHURY, I.; BHATTACHARYA, B. An assessment of satellite-based agricultural water productivity over the Indian region. **International Journal of Remote Sensing**, [S.L.], v. 39, n. 8, p. 2294-2311, 9 jan. 2018. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2017.1421792>.

COELHO, A. L. N.; CORREA, W. S. C. Temperatura de superfície celsius do sensor tirs/landsat-8: metodologia e aplicações: surface temperature sensor tirs/landsat-8: methodology and applications. **Revista Geográfica Brasileira**, Boa Vista, v. 7, n. 1, p. 31-45, jul. 2013.

CUNHA, F. F.; MAGALHÃES, F. F.; CASTRO, M. A.; SOUZA, E. J. Performance of estimative models for daily reference evapotranspiration in the city of Cassilândia, Brazil. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 37, n. 1, p. 173-184, fev. 2017. FapUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v37n1p173-184/2017>.

CUNHA, G. R.; PIRES, J. L. F.; DALMAGO, G. A.; SANTI, A.; PASINATO, A.; SILVA, A. A. G.; ASSAD, E. D.; ROSA, C. M. El Niño/La Niña - Oscilação Sul e seus impactos na agricultura brasileira: fatos, especulações e aplicações. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 1, n. 121, p. 18-22, jan. 2011. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/914645>.

CUNHA, G. R.; PIRES, J. L. F.; DALMAGO, G. A.; PASINATO, A.; SILVA, A. A. G.; ASSAD, E. D.; ROSA, C. M. El Niño/La Niña - Oscilação Sul e seus impactos na agricultura brasileira: fatos, especulações e aplicações. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 1, n. 121, p. 18-22, jan. 2011. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/914645>.

D'ANGELO, J. V. H. **Manual para utilização do Sistema Internacional de Unidades** [S.L.]. 2004. Disponível em:

<https://www.feq.unicamp.br/images/stories/documentos/eq481_manual_si.pdf>. Acesso em: 10 set. 2019.

DELGADO, R. C.; SOUZA, L. P.; PEREIRA, M. G.; ALMEIDA, C. T.; RODRIGUES, R. Á. Orbital and surface evapotranspiration compared to fao-56 standard in state of Acre. **Irriga**, [S.L.], v. 22, n. 3, p. 547-559, 28 ago. 2017. Brazilian Journal of Irrigation and Drainage - IRRIGA. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2017v22n3p547-559>.

DIDAN, K.; MUNOZ, A. B.; SOLANO, R.; HUETE, A. **MODIS Vegetation Index User's Guide**. (MOD13 Series). 2015. Disponível em: https://vip.arizona.edu/documents/MODIS/MODIS_VI_UsersGuide_June_2015_C6.pdf. Acesso em: 09 set. 2021.

DJAMAN, K.; IRMAK, S.; SALL, M.; SOW, A.; KABENGE, I. Comparison of sum-of-hourly and daily time step tandardized ASCE Penman-Monteith reference evapotranspiration. **Theoretical and Applied Climatology**, [S.L.], v. 134, n. 1-2, p. 533-543, 13 out. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-017-2291-6>.

EARTHEXPLORER. United States Geological Survey (USGS). **Imagem Landsat**. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 25 maio 2021.

EMELYANOVA, I. V.; MCVICAR, T. R.; VAN NIEL, T. G.; LI, L. T.; VAN DIJK, A. I. J. M. Assessing the accuracy of blending Landsat–MODIS surface reflectances in two landscapes with contrasting spatial and temporal dynamics: a framework for algorithm selection. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 133, p. 193-209, jun. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.007>.

EROS, Earth Resources Observation and Science. **USGS EROS Archive - Landsat Archives - Landsat 8-9 Operational Land Imager and thermal Infrared Sensor Collection 2 Level-1 Data**. 2021. Collection 2 Landsat 8-9 OLI/TIRS Digital Object Identifier (DOI) number: /10.5066/P975CC9B. Disponível em: <https://doi.org/10.5066/P975CC9B>. Acesso em: 17 jun. 2021.

ESA, European Space Agency. **Sentinel-2**. 2020. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>. Acesso em: 07 set. 2021.

ESA, European Space Agency. **Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services**. Março 2012a. Disponível em: https://sentinel.esa.int/documents/247904/349490/S2_SP-1322_2.pdf. Acesso em: 07 set. 2021.

ESA, European Space Agency. **Sentinel-3: ESA's Global Land and Ocean Mission for GMES Operational Services**. Outubro 2012b. Disponível em: https://sentinel.esa.int/documents/247904/351187/S3_SP-1322_3.pdf. Acesso em: 07 set. 2021.

ESTÉVEZ, J.; GAVILÁN, P.; BERENGENA, J. Sensitivity analysis of a Penman-Monteith type equation to estimate reference evapotranspiration in southern Spain.

Hydrological Processes, [S.L.], v. 23, n. 23, p. 3342-3353, 15 nov. 2009. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.7439>.

FAN, J.; MENG, J.; ASHKENAZY, Y.; HAVLIN, S.; SCHELLNHUBER, H. J. Network analysis reveals strongly localized impacts of El Niño. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [S.L.], v. 114, n. 29, p. 7543-7548, 3 jul. 2017. Proceedings of the National Academy of Sciences. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1701214114>.

FAN, Z.; THOMAS, A. Decadal changes of reference crop evapotranspiration attribution: spatial and temporal variability over china 1960-2011. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 560, p. 461-470, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.080>.

FERREIRA, S. C. A centralidade de Londrina, Maringá, Cascavel, Ponta Grossa e Guarapuava na rede urbana do paraná. **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, [S.L.], v. 23, p. 6-23, 3 nov. 2011. Universidade Federal do Parana. <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v23i0.24696>.

FGV (Fundação Getúlio Vargas). **Estudo sobre eficiência do uso da água no Brasil: análise do impacto da irriga o na agricultura brasileira e potencial de produ o de alimentos face ao aquecimento global**. Rio de Janeiro - Rj: Gv Agro Centro de Estudos do Agronegócio, 2016. 17 p. <Http://gvagro.fgv.br/pesquisa>.

FILGUEIRAS, R.; MANTOVANI, E. C.; ALTHOFF, D.; DIAS, S. H. B.; CUNHA, F. F.; VENANCIO, L. P. a. Productivity and water demand of maize estimated by the modified satellite Priestley-Taylor algorithm. **Semina: Ciências Agrárias**, [S.L.], v. 40, n. 62, p. 2991, 30 set. 2019a. Universidade Estadual de Londrina. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n6supl2p2991>.

FILGUEIRAS, R.; MANTOVANI, E. C.; ALTHOFF, D.; DIAS, S. H. B.; CUNHA, F. F. b. Sensitivity of evapotranspiration estimated by orbital images under influence of surface temperature. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 39, n. , p. 23-32, set. 2019b. FapUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v39nep23-32/2019>.

FILGUEIRAS, R.; MANTOVANI, E. C.; FERNANDES-FILHO, E. I.; CUNHA, F. F.; ALTHOFF, D.; DIAS, S. H. B. Fusion of MODIS and Landsat-Like Images for Daily High Spatial Resolution NDVI. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 12, n. 8, p. 1297, 20 abr. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12081297>.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A. Rela o entre el nino oscila o sul (enos), precipita o e rendimento de milho no estado do rio grande do sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 2, n. 1, p. 39-46, 25 set. 1995. Disponível em: <<http://revistapag.agricultura.rs.gov.br/ojs/index.php/revistapag/article/view/558>>. Acessado em: 20 jun. 2021.

GAO, B., et al., 2015. MODIS Atmosphere L2 Water Vapor Product. NASA MODIS Adaptive Processing System, Goddard Space Flight Center, USA: DOI http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MYD05_L2.006 (Aqua)

GAO, B; KAUFMAN, Y. **The MODIS Near-IR Water Vapor Algorithm**: product id: mod05 - total precipitable water. [S.L.]: Nasa, 1998. 25 p. (Algorithm Technical

Background Document). Disponível em: https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod03.pdf. Acesso em: 20 jun. 2021.

GAO, F.; MASEK, J.; SCHWALLER, M.; HALL, F. On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: predicting daily landsat surface reflectance. **Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, [S.L.], v. 44, n. 8, p. 2207-2218, ago. 2006. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tgrs.2006.872081>.

GGWS, Golden Gate Weather Services. **El Niño and La Niña Years and Intensities**. 2021. Disponível em: <https://ggweather.com/enso/oni.htm>. Acesso em: 22 maio 2021.

GHOLAMNIA, M.; BOLOORANI, A. D.; HAMZEH, S.; KIAVARZ, M. Diurnal Air Temperature Modeling Based on the Land Surface Temperature. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 9, n. 9, p. 915, 1 set. 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs9090915>.

GIBSON, L. A. et al. Review: Estimating evapotranspiration using remote sensing and the Surface Energy Balance System – A South African perspective. **Water Sa**, [s.l.], v. 39, n. 4, p.477-484, 10 jul. 2013. Academy of Science of South Africa. <http://dx.doi.org/10.4314/wsa.v39i4.5>.

GLENN, E. P.; NAGLER, P. L.; HUETE, A. R. Vegetation Index Methods for Estimating Evapotranspiration by Remote Sensing. **Surveys in Geophysics**, [S.L.], v. 31, n. 6, p. 531-555, 17 out. 2010. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10712-010-9102-2>.

GRASS. **Geographic Resources Analysis Support System (GRASS)**. 2021. Disponível em: grass.osgeo.org. Acesso em: 15 jun. 2021.

GUO, B.; YANG, F.; WU, H.; ZHANG, R.; ZANG, W.; WEI, C.; JIANG, G.; MENG, C.; ZHAO, H.; ZHEN, X. How the variations of terrain factors affect the optimal interpolation methods for multiple types of climatic elements? **Earth Science Informatics**, [S.L.], v. 14, n. 2, p. 1021-1032, 23 mar. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12145-021-00609-2>.

GURSKI, B. C.; JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M. Alternative reference evapotranspiration methods for the main climate types of the state of Paraná, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 53, n. 9, p. 1003-1010, set. 2018. FapUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2018000900003>.

HEIMHUBER, V.; TULBURE, M. G.; BROICH, M. Addressing spatio-temporal resolution constraints in Landsat and MODIS-based mapping of large-scale floodplain inundation dynamics. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 211, p. 307-320, jun. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.016>.

HERMAN, M. R.; NEJADHASHEMI, A. P.; ABOUALI, M.; HERNANDEZ-SUAREZ, J. S.; DANESHVAR, F.; ZHANG, Z.; ANDERSON, M. C.; SADEGHI, A. M.; HAIN, C. R.; SHARIFI, A. Evaluating the role of evapotranspiration remote sensing data in improving hydrological modeling predictability. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 556, p. 39-49, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.009>.

HOELL, A.; GAUGHAN, A. E.; SHUKLA, S.; MAGADZIRE, T. the Hydrologic Effects of Synchronous El Niño–Southern Oscillation and Subtropical Indian Ocean Dipole Events over Southern Africa. **Journal of Hydrometeorology**, [S.L.], v. 18, n. 9, p. 2407-2424, 1 set. 2017. American Meteorological Society. <http://dx.doi.org/10.1175/jhm-d-16-0294.1>.

IAT (Instituto Água e Terra). Bacia hidrográfica do Rio Tibagi: módulo 1 – diagnóstico e módulo 2 – iniciativas em andamento na bacia. Governo do Estado do Paraná. 2009.

IAT (Instituto Água e Terra). Plano de bacia do rio Tibagi: Precipitação média anual. Vol. 1. Governo do estado do Paraná. 2009. Disponível em: <<http://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Comite-da-Bacia-do-Rio-Tibagi>>.

IMMERZEEL, W.W.; DROOGERS, P. Calibration of a distributed hydrological model based on satellite evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 349, n. 1, p. 411-424, 2008. Doi:10.1016/j.jhydrol.2007.11.017.

INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). **Normais Climatológicas do Brasil**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso em: 27 maio 2020.

INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia). Bureau International Des Poids Et Mesures (BIPM). **O Sistema Internacional de Unidades**. Rio de Janeiro, 2014. 16 p. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/sistema_internacional_de_unidades_suplementohttp://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/sistema_internacional_de_unidades_suplemento_2014-2016-Jan.pdf_2014-2016-Jan.pdf>. Acesso em: 05 set. 2019.

JANUAR, T. W.; LIN, T.; HUANG, C.; CHANG, K. Modifying an Image Fusion Approach for High Spatiotemporal LST Retrieval in Surface Dryness and Evapotranspiration Estimations. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 12, n. 3, p. 498, 4 fev. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12030498>.

JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M.; SILVA, L. C. R. Expanding the geography of evapotranspiration: An improved method to quantify land-to-air water fluxes in tropical and subtropical regions. **PLOS ONE**, v. 12, n. 6, p. 1-1, 2017. Disponível <<http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/publicacoes.htm>>. Acesso em: 1 set. 2019.

JI, D.; SHI, J.; XIONG, C.; WANG, T.; ZHANG, Y. A total precipitable water retrieval method over land using the combination of passive microwave and optical remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 191, p. 313-327, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.01.028>.

JING, W.; YASEEN, Z. M.; SHAHID, S.; SAGGI, M. K.; TAO, H.; KISI, O.; SALIH, S. Q.; AL-ANSARI, N.; CHAU, K. Implementation of evolutionary computing models for reference evapotranspiration modeling: short review, assessment and possible future research directions. **Engineering Applications of Computational Fluid**

Mechanics, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 811-823, 1 jan. 2019. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/19942060.2019.1645045>.

KARIMI, P.; BASTIAANSEN, W. G. M.; MOLDEN, D.; CHEEMA, M. J. M. Basin-wide water accounting based on remote sensing data: an application for the Indus basin. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S.L.], v. 17, n. 7, p. 2473-2486, 4 jul. 2013. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-17-2473-2013>.

KE, Y.; IM, J.; PARK, S.; GONG, H. Spatiotemporal downscaling approaches for monitoring 8-day 30 m actual evapotranspiration. **Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [S.L.], v. 126, p. 79-93, abr. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.02.006>.

KLOOG, I.; CHUDNOVSKY, A.; KOUTRAKIS, P.; SCHWARTZ, J. Temporal and spatial assessments of minimum air temperature using satellite surface temperature measurements in Massachusetts, USA. **Science of the Total Environment**, [S.L.], v. 432, p. 85-92, ago. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.05.095>.

LEIVAS, J. F.; TEIXEIRA, A. H. C.; MIRANDA, F.; TAKEMURA, C. M.; GARÇON, E. A. Imagens sentinel para obtenção de parâmetros agrometeorológicos espectrais, em área de cultivo de coqueiro anão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 18., 2019, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2019. 10 p.

LI, L.; ZHA, Y. Mapping relative humidity, average and extreme temperature in hot summer over China. **Science of the Total Environment**, [S.L.], v. 615, p. 875-881, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.022>.

LI, Y.; HUANG, C.; HOU, J.; GU, J.; ZHU, G.; LI, X. Mapping daily evapotranspiration based on spatiotemporal fusion of ASTER and MODIS images over irrigated agricultural areas in the Heihe River Basin, Northwest China. **Agricultural and Forest Meteorology**, [S.L.], v. 244-245, p. 82-97, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.05.023>.

LIU, M.; LIU, X.; DONG, X.; ZHAO, B.; ZOU, X.; WU, L.; WEI, H. An Improved Spatiotemporal Data Fusion Method Using Surface Heterogeneity Information Based on ESTARFM. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 12, n. 21, p. 3673, 9 nov. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12213673>.

LIU, S.; ZHA, Y.; ZHANG, J.; GAO, J.; ZHANG, Q. Detection of haze and its intensity based on visibility and relative humidity estimated from MODIS data. **International Journal of Remote Sensing**, [S.L.], v. 38, n. 23, p. 7085-7100, 31 ago. 2017. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2017.1371866>.

LOPES, I.; LEAL, B. G. Evapotranspiração horária x diária utilizando penmanmonteith para o polo de desenvolvimento Petrolina-PE/Juazeiro-BA. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, [S.L.], v. 10, n. 5, p. 914-924, 31 out. 2016. INOVAGRI. <http://dx.doi.org/10.7127/rbai.v10n500465>.

LÓPEZ-URREA, R.; OLALLA, F. M. S.; FABEIRO, C.; MORATALLA, A. An evaluation of two hourly reference evapotranspiration equations for semiarid

conditions. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 86, n. 3, p. 277-282, dez. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2006.05.017>.

LU, E.; TAKLE, E. S. Spatial variabilities and their relationships of the trends of temperature, water vapor, and precipitation in the North American Regional Reanalysis. **Journal of Geophysical Research**, [S.L.], v. 115, n. 6, p. 1-11, 30 mar. 2010. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2009jd013192>.

LUENENBERG, Z. A. V.; NETO, P. H. W.; GARBUIO, P. W.; DELALIBERA, H. C. Consumption and application cost of irrigation water. **Ambiência**, Guarapuava, Pr, v. 5, n. 2, p. 293-300, jun. 2009. Maio/Ago. ISSN 1808 - 0251.

LUZ, G. A.; GUASSELLI, L. A.; ROCHA, D. Temperature Surface of Guaíba Lake, RS, from time series of MODIS images. **RBRH**, [S.L.], v. 22, p. 2-14, 2017. FapUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011716094>.

MA, Z.; YAN, N.; WU, B.; STEIN, A.; ZHU, W.; ZENG, H. Variation in actual evapotranspiration following changes in climate and vegetation cover during an ecological restoration period (2000–2015) in the Loess Plateau, China. **Science of the Total Environment**, [S.L.], v. 689, p. 534-545, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.155>.

MAČEK, Urška; BEZAK, Nejc; IRAJ, Mojca. Reference evapotranspiration changes in Slovenia, Europe. **Agricultural and Forest Meteorology**, [S.L.], v. 260-261, p. 183-192, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.06.014>.

MATZENAUER, R.; BERLATO, M. A.; SAMPAIO, M. R.; TRINDADE, J. K. Efeitos do fenômeno Enos sobre a evapotranspiração de referência na região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul, Brasil. **Pesq. Agrop. Gaúcha**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 67-70, 15 maio 2008.

MATZENAUER, R.; RADIN, B.; MALUF, J. R. T. O fenômeno ENOS e o regime de chuvas no Rio Grande do Sul. **Agrometeoros**, [S.L.], v. 25, n. 2, p. 323-331, 29 nov. 2018. AGROMETEOROS. <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v25i2.25510>.

MEDRI, M. E.; BIANCHINI, E; SHIBATTA, O. A.; PIMENTA, J. A. **A Bacia do Rio Tibagi**. Londrina -Pr: Câmara Brasileira do Livro, 2002. 602 p. ISBN 85-902390-1-2 / 85-902392-1-7 / 85-902394-1-1 / 85-902395-1-9.

MELO, G.; FERNANDES, A. L. T. Evaluation of empirical methods to estimate reference evapotranspiration in Uberaba, State of Minas Gerais, Brazil. **Revista da Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.32, n.5, p.875-888, 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v32n5/07.pdf>>.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Bahia: CNPq, 2012. 276 p.

MEYER, D.; RIECHERT, M. Open source QGIS toolkit for the Advanced Research WRF modelling system. **Environmental Modelling & Software**, [S.L.], v. 112, p. 166-178, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.10.018>.

MEZA, F. J. Variability of reference evapotranspiration and water demands. Association to ENSO in the Maipo river basin, Chile. **Global and Planetary Change**, [S.L.], v. 47, n. 2-4, p. 212-220, jul. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.10.013>.

MOURA, C. R. W.; ZOLNIER, S.; RIBEIRO, A.; OLIVEIRA, R. A. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração horária para alface cultivada em sistema hidropônico em ambiente protegido. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 30, n. 4, p. 646-656, ago. 2010. FapUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-69162010000400009>.

MU, Q.; HEINSCH, F. A.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 111, n. 4, p. 519-536, dez. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2007.04.015>.

MUTIIBWA, D.; STRACHAN, S.; ALBRIGHT, T. Land Surface Temperature and Surface Air Temperature in Complex Terrain. **Journal of Selected Topics In Applied Earth Observations and Remote Sensing**, [S.L.], v. 8, n. 10, p. 4762-4774, out. 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/jstars.2015.2468594>.

NOURI, H.; FARAMARZI, M.; SOBHANI, B.; SADEGHI, S. H. Estimation of evapotranspiration based on surface energy balance algorithm for land (SEBAL) using LANDSAT 8 and modis images. **Applied Ecology and Environmental Research**, [S.L.], v. 15, n. 4, p. 1971-1982, 2017. Applied Ecology and Environmental Research. http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1504_19711982.

OLIVEIRA, L. M. M.; LIMA, M. S. M. G.; SILVA, B. B.; MOURA, A. E. S. S. Balanço de radiação por sensoriamento remoto em bacia hidrográfica da zona da mata nordestina. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S.L.], v. 30, n. 1, p. 16-28, mar. 2015. FapUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620130652>.

OLIVEIRA, S. R. **Ajuste do método Moretti-Jerszurki-Silva para estimar a evapotranspiração de referência diária e horária dos tipos climáticos brasileiros**. Curitiba, 2018. 537p. Tese (Doutorado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

PACA, V. H. M.; ESPINOZA-DÁVALOS, G. E.; HESSELS, T. M.; MOREIRA, D. M.; COMAIR, G. F.; BASTIAANSEN, W. G. M. The spatial variability of actual evapotranspiration across the Amazon River Basin based on remote sensing products validated with flux towers. **Ecological Processes**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 1-20, 15 fev. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1186/s13717-019-0158-8>.

PAREDES, P.; TRIGO, I.; BRUIN, H.; SIMÕES, N.; PEREIRA, L. S. Daily grass reference evapotranspiration with Meteosat Second Generation shortwave radiation and reference ET products. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 248, p. 106543, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106543>.

PAULA, A. C. P.; SILVA, C. L.; RODRIGUES, L. N.; SCHERER-WARREN, M. Performance of the SSEBop model in the estimation of the actual evapotranspiration of soybean and bean crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 54, p. 1-11, 2019. FapUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-3921.pab2019.v54.00739>.

PAZ, A. R. **Hidrologia Aplicada**. Disciplina Ministrada (curso de graduação em Engenharia de Bioprocessos) – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Caxias do Sul, 2004.

PELTA, R.; CHUDNOVSKY, A. A. Spatiotemporal estimation of air temperature patterns at the street level using high resolution satellite imagery. **Science of the Total Environment**, [S.L.], v. 579, p. 675-684, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.042>.

PEREIRA, A. R.; PRUITT, W. O. Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 66, n. 3, p. 251-257, maio 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2003.11.003>.

PIRES, E. G.; FERREIRA JUNIOR, L. G. Mapeamento da temperatura de superfície a partir de imagens ter. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, Não use números Romanos ou letras, use somente números Arábicos. 2015, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: Inpe, 2015. p. 7421-7428.

PORTELA, M. M.; SANTOS, J.; STUDART, T. M. C. Effect of the Evapotranspiration of Thornthwaite and of Penman- Monteith in the Estimation of Monthly Streamflows Based on a Monthly Water Balance Model. **Intechopen**, [S.L.], v. 3, n. 1, p. 1-14, 17 set. 2019. DOI: 10.5772/intechopen.88441.

RADOČAJ, D.; JURIČIĆ, M.; ZEBEC, V.; PLAČČAK, I. Delineation of Soil Texture Suitability Zones for Soybean Cultivation: a case study in continental Croatia. **Agronomy**, [S.L.], v. 10, n. 6, p. 823, 10 jun. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy10060823>.

RAMÍREZ-CUESTA, J.M.; ALLEN, R.G.; INTRIGLIOLO, D.S.; KILIC, A.; ROBISON, C.W.; TREZZA, R.; SANTOS, C.; LORITE, I.J. METRIC-GIS: an advanced energy balance model for computing crop evapotranspiration in a GIS environment. **Environmental Modelling & Software**, [S.L.], v. 131, p. 104770, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104770>.

REES, S.W.; ADJALI, M.H.; ZHOU, Z.; DAVIES, M.; THOMAS, H.R. Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 4, n. 3, p. 213-265, set. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1364-0321\(99\)00018-0](http://dx.doi.org/10.1016/s1364-0321(99)00018-0).

ROGERS, S. R.; STAUB, B. Standard use of Geographic Information System (GIS) techniques in honey bee research. **Journal of Apicultural Research**, [S.L.], v. 52, n. 4, p. 1-48, jan. 2013. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.3896/ibra.1.52.4.08>.

ROY, D. P.; WULDER, M. A.; LOVELAND, T. R.; WOODCOCK, C. E.; ALLEN, R. G.; ANDERSON, M. C.; HELDER, D.; IRONS, J. R.; JOHNSON, D. M.; KENNEDY, R.

Landsat-8: science and product vision for terrestrial global change research. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 145, p. 154-172, abr. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>.

RUHOFF, A. L.; PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; ARAGAO, L. E. O. C.; ROCHA, H. R.; MALHI, Y. S. A MODIS-Based Energy Balance to Estimate Evapotranspiration for Clear-Sky Days in Brazilian Tropical Savannas. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 4, n. 3, p. 703-725, 12 mar. 2012. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs4030703>.

RUNNING, S. W.; MU, Q.; ZHAO, M.; MORENO, A. **User's Guide MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product**: nasa earth observing system modis land algorithm (for collection 6). NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (For Collection 6). 2019. Disponível em: <https://modis-land.gsfc.nasa.gov/pdf/MOD16UsersGuideV2.022019.pdf>. Acesso em: 09 set. 2021.

SADO, R.; WARREN, M.; ROIG, H. Estimativa de irrigação por meio de sensoriamento remoto na bacia hidrográfica do Alto São Marcos. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S.L.], v. 70, n. 3, p. 787-802, 30 set. 2018. EDUFU - Editora da Universidade Federal de Uberlândia. <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv70n3-45700>.

SAGA. **System for Automated Geoscientific Analysis (SAGA)**. 2021. Disponível em: <http://www.saga-gis.org/>. Acesso em: 19 jun. 2021.

SANTOS, A. A. **Evapotranspiração de referência horária e diária para o Estado do Paraná**. Curitiba, 2020. 214p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

SEMA (Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos). **Bacias Hidrográficas do Paraná**: série histórica. Curitiba: Sema - Pr, 2013. 140 p. (2ª Edição).

SENAY, G. B.; FRIEDRICH, M.; SINGH, R. K.; VELPURI, N. M. Evaluating Landsat 8 evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River Basin. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 185, p. 171-185, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.043>.

SENAY, G. B.; SCHAUER, M.; VELPURI, N. M.; SINGH, R. K.; KAGONE, S.; FRIEDRICH, M.; LITVAK, M. E.; DOUGLAS-MANKIN, K. R. Long-Term (1986–2015) Crop Water Use Characterization over the Upper Rio Grande Basin of United States and Mexico Using Landsat-Based Evapotranspiration. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 11, n. 13, p. 1587, 4 jul. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs11131587>.

SHABBIR, A.; ARSHAD, M.; BAKHSH, A.; USMAN, M.; SHAKOOR, A.; AHMAD, I.; AHMAD, A. Apparent and real water productivity for cotton-wheat zone of punjab, Pakistan. **Pakistan Journal of Agricultural Sciences**, Faisalabad, Paquistão, v. 49, n. 3, p. 357-363, abr. 2012. Bimestral. ISSN (Online) 2076-0906.

SHAH, S. B.; EDLING, R. J. Daily evapotranspiration prediction from Louisiana flooded rice field. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [s.l.], v. 126, n. 1, p.8-13, fev. 2000.

SHI, F.; ZHAO, C.; ZHOU, X.; LI, X. Spatial Variations of Climate-Driven Trends of Water Vapor Pressure and Relative Humidity in Northwest China. **Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences**, [S.L.], v. 55, n. 2, p. 221-231, 15 out. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13143-018-0062-7>.

SILVA, C. O. F.; TEIXEIRA, A. H. C.; MANZIONE, R. L. Agriwater: An R package for spatial modelling of energy balance and actual evapotranspiration using satellite images and agrometeorological data. **Environmental Modelling & Software**, [S.L.], v. 120, n. 1, p. 1-19, 30 jul. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104497>.

SINGH, R.; SENAY, G. Comparison of Four Different Energy Balance Models for Estimating Evapotranspiration in the Midwestern United States. **Water**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 9, 26 dez. 2015. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w8010009>.

SOUZA, J. L. M. **Fundamentos de matemática e estatística para formulação de modelos e análise de dados: aplicado às ciências agrárias**. Curitiba, Plataforma Moretti/DSEA/SCA/UFPR, 2018. (Manual didático)

SOUZA, J. L. M.; OLIVEIRA, S. R.; ROSA, S. L. K.; JERSZURKI, D. Hourly reference evapotranspiration by Moretti-Jerszurki-Silva method using data from alternative station. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 25, n. 8, p. 505-513, ago. 2021. FapUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n8p505-513>.

STRECK, N. A.; ROSA, H. T.; WALTER, L. C.; BOSCO, L. C.; LAGO, I.; HELDWEIN, A. B. O fenômeno El Niño Oscilação Sul e a variabilidade interanual da evaporação do tanque Classe A e da umidade relativa do ar em Santa Maria, RS. **Ciência Rural**, [S.L.], v. 38, n. 5, p. 1452-1455, ago. 2008. FapUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84782008000500041>.

SUGAWARA, L. M.; RUDORFF, B. F. T.; ADAMI, M. Viabilidade de uso de imagens do Landsat em mapeamento de área cultivada com soja no Estado do Paraná. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 43, n. 12, p. 1777-1783, dez. 2008. FapUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2008001200019>.

SYPERRECK, V. L. G. et al. Avaliação de desempenho de métodos para estimativas de evapotranspiração de referência para a região. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 30, n. 5, p.603-609, 2008. Redalyc. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303026583001>>. Acesso em: 21 set. 2019.

TALSMA, C. J.; GOOD, S. P.; JIMENEZ, C.; MARTENS, B.; FISHER, J. B.; MIRALLES, D. G.; MCCABE, M. F.; PURDY, A. J. Partitioning of evapotranspiration in remote sensing-based models. **Agricultural and Forest Meteorology**, [S.L.], v. 260-261, p. 131-143, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.05.010>.

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F.; BOLFE, E. L. Energy balance with Landsat images in irrigated central pivots with corn crop in the São Paulo State, Brazil. **Proceedings of Spie**, Amsterdam, v. 9239, n. 1, p. 1-11, 29 out. 2014. Doi: 10.1117/12.2067090.

THORNTHWAITE, C. W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. **Geographical Review**, [S.L.], v. 38, n. 1, p. 55-94, jan. 1948. [Http://www.jstor.org/stable/210739](http://www.jstor.org/stable/210739).

TYAGI, N. K; SHARMA, D. K; LUTHRA, S. K. Determination of evapotranspiration and crop coefficients of rice and sunflower with lysimeter. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 45, n. 1, p. 41-54, jun. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0378-3774\(99\)00071-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0378-3774(99)00071-2).

USGS (South Dakota). National Aeronautics and Space Administration (nasa). **Landsat 8 (L8) Data Users Handbook**. 4. ed. Sioux Falls: U.s. Geological Survey (usgs), 2019. 115 p. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-8-data-users-handbook>>. Acesso em: 02 set. 2019.

USGS. Landsat – Earth observation satellites. **Fact Sheet**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 1-4, jun. 2016. US Geological Survey. <http://dx.doi.org/10.3133/fs20153081>. Disponível em: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/fs20153081>. Acesso em: 15 jun. 2021.

USGS. Landsat: a global land-imaging mission. **Fact Sheet**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 1-1, 2012. US Geological Survey. <http://dx.doi.org/10.3133/fs20123072>. Disponível em: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/fs20123072>. Acesso em: 16 jun. 2021.

VANINO, S.; NINO, P.; MICHELE, C.; BOLOGNESI, S. F.; D'URSO, G.; BENE, C.; PENNELLI, B.; VUOLO, F.; FARINA, R.; PULIGHE, G. Capability of Sentinel-2 data for estimating maximum evapotranspiration and irrigation requirements for tomato crop in Central Italy. **Remote Sensing of Environment**, [s. l], p. 452-470, 24 jun. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.06.035>.

VENANCIO, L. P.; EUGENIO, F. C.; FILGUEIRAS, R.; CUNHA, F. F.; SANTOS, R. A.; RIBEIRO, W. R.; MANTOVANI, E. C. Mapping within-field variability of soybean evapotranspiration and crop coefficient using the Earth Engine Evaporation Flux (EEFlux) application. **PLOS ONE**, [S.L.], v. 15, n. 7, p. 1-20, 9 jul. 2020. Public Library of Science (PLOS). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0235620>.

WAGLE, P.; BHATTARAI, N.; GOWDA, P. H.; KAKANI, V. G. Performance of five surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in high biomass sorghum. **Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [S.L.], v. 128, p. 192-203, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.03.022>.

WANG, D.; YU, T.; LIU, Y.; GU, X.; MI, X.; SHI, S.; MA, M.; CHEN, X.; ZHANG, Y.; LIU, Q. Estimating Daily Actual Evapotranspiration at a Landsat-Like Scale Utilizing Simulated and Remote Sensing Surface Temperature. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 13, n. 2, p. 225, 11 jan. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs13020225>.

WANG, T.; TANG, R.; LI, Z.; JIANG, Y.; LIU, M.; NIU, L. An Improved Spatio-Temporal Adaptive Data Fusion Algorithm for Evapotranspiration Mapping. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 11, n. 7, p. 761, 29 mar. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs11070761>.

WENG, Q.; FU, P.; GAO, F. Generating daily land surface temperature at Landsat resolution by fusing Landsat and MODIS data. **Remote Sensing of Environment**,

[S.L.], v. 145, p. 55-67, abr. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.003>.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the Evaluation and Comparison of Models. **Journal of Geophysical Research**, [s.l.], v. 90, n. 5, p.8995-9005, 20 set. 1985. Paper number 5C0173. 0148-0227/85/005C-0173505.00.

WULDER, M. A.; LOVELAND, T. R.; ROY, D. P.; CRAWFORD, C. J.; MASEK, J. G.; WOODCOCK, C. E.; ALLEN, R. G.; ANDERSON, M. C.; BELWARD, A. S.; COHEN, W. B. Current status of Landsat program, science, and applications. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 225, p. 127-147, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.015>.

YAN, H.; WANG, S.Q.; BILLESBACH, D.; OECHEL, W.; ZHANG, J.H.; MEYERS, T.; MARTIN, T.A.; MATAMALA, R.; BALDOCCHI, D.; BOHRER, G. Global estimation of evapotranspiration using a leaf area index-based surface energy and water balance model. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 124, p. 581-595, set. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.06.004>.

YANG, G.; WENG, Q.; PU, R.; GAO, F.; SUN, C.; LI, H.; ZHAO, C. Evaluation of ASTER-Like Daily Land Surface Temperature by Fusing ASTER and MODIS Data during the HiWATER-MUSOEXE. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 75, 21 jan. 2016. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs8010075>.

YANG, Y.; ANDERSON, M. C.; GAO, F.; HAIN, C. R.; SEMMENS, K. A.; KUSTAS, W. P.; NOORMETS, A.; WYNNE, R. H.; THOMAS, V. A.; SUN, G. Daily Landsat-scale evapotranspiration estimation over a forested landscape in North Carolina, USA, using multi-satellite data fusion. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S.L.], v. 21, n. 2, p. 1017-1037, 17 fev. 2017. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-21-1017-2017>.

YI, Z.; ZHAO, H.; JIANG, Y. Continuous Daily Evapotranspiration Estimation at the Field-Scale over Heterogeneous Agricultural Areas by Fusing ASTER and MODIS Data. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 10, n. 11, p. 1694, 26 out. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs10111694>.

ZHANG, H. K.; HUANG, B.; ZHANG, M.; CAO, K.; YU, L. A generalization of spatial and temporal fusion methods for remotely sensed surface parameters. **International Journal of Remote Sensing**, [S.L.], v. 36, n. 17, p. 4411-4445, 2 set. 2015. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2015.1083633>.

ZHU, X.; CHEN, J.; GAO, F.; CHEN, X.; MASEK, J. G. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 114, n. 11, p. 2610-2623, nov. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2010.05.032>.

ZIMMERMANN, C. M.; GUIMARÃES, O.; PERALTA-ZAMORA, P. G. Avaliação da qualidade do corpo hídrico do rio tibagi na região de ponta grossa utilizando análise de componentes principais (pca). **Química Nova**, [S.L.], v. 31, n. 7, p. 1727-1732, jan. 2008.

APÊNDICE 1 – SCRIPT EM LINGUAGEM PYTHON PARA TRANSFORMAR IMAGENS DO SATÉLITE AQUA/MODIS NO FORMATO “.hdf” PARA “.geotiff”.

As imagens do produto MYD05 vem no formato hdf. Desta forma, é necessário transformar a imagem do formato “.hdf” para “.geotiff”, extensão suportada pelo Qgis para processamento de imagem. A transformação do dado *raster* foi feita por meio de *script* em linguagem Python, executada no *software* Qgis, conforme código descrito a seguir:

```

1. # Carregar pacote da biblioteca gdal#
2. import gdal, os

3. # Listar os arquivos rasters de entrada#
4. # Altera-se o diretório onde o arquivo .hdf no computador
do usuário#
5.
os.chdir('C:\\00_MESTRADO_SOLOS\\DISSERTACAO\\BASES\\RASTERS\\
AQUA_MODIS\\hdf\\hdf (1)')
6. rasterFiles = os.listdir(os.getcwd())
7. print(rasterFiles)

8. # Abrir o arquivo HDF#
9. hdfLayer = gdal.Open(rasterFiles[0], gdal.GA_ReadOnly)

10. # Pacote que lê os layer dentro do arquivo .hdf#
11. hdfLayer.GetSubDatasets()

12. ##A partir deste ponto será repetido um conjunto de
comandos para exportar diferentes camadas rasters de
interesse#

13. ## Abrir a camada rasters de interesse (Cloud_Mask_QA ->
[18]) no HDF#
14. # Para selecionar o produto que se quer exportar altera-
se: GetSubDatasets()[18][0]#
15. rlayer_1 = gdal.Open(hdfLayer.GetSubDatasets()[18][0],
gdal.GA_ReadOnly)

16. # Definir o produto de saída e projeção#
17. # Altera-se o final do nome original do arquivo .hdf para
identificar o produto exportado#
18. # Altere: ['LOCALGRANULEID'][:-4]+'_18.tif'#
19. outputName_1 =
rlayer_1.GetMetadata_Dict()['LOCALGRANULEID'][:-4]+'_18.tiff'
20. # Altera-se o início do nome original do arquivo .hdf#
21. # Insira no final do diretório a nomenclatura que achar
necessária: '...\\IMG_' ou '...\\SAIDA_' etc#

```

```

22. outputRaster_1 =
'C:\\00_MESTRADO_SOLOS\\DISSERTACAO\\BASES\\RASTERS\\AQUA_MODI
S\\tiff\\IMG_'+ outputName_1
23. gdal.Warp(outputRaster_1,rlayer_1,dstSRS='EPSG:4674')

24. # Adicionar a saída ao mapa#
25. iface.addRasterLayer(outputRaster_1, outputName_1)

26. ## Abrir a camada rasters de interesse
(Water_Vapor_Near_Infrared -> [19]) no HDF#
27. # Para selecionar o produto que se quer exportar altera-
se: GetSubDatasets()[19][0]#
28. rlayer_2 = gdal.Open(hdflayer.GetSubDatasets()[19][0],
gdal.GA_ReadOnly)

29. # Definir o produto de saída e projeção#
30. # Altera-se o final do nome original do arquivo .hdf para
identificar o produto exportado#
31. # Altere: ['LOCALGRANULEID'][:-4]+'_19.tif'#
32. outputName_2 =
rlayer_2.GetMetadata_Dict()['LOCALGRANULEID'][:-4]+'_19.tiff'
33. # Altera-se o início do nome original do arquivo .hdf#
34. # Insira no final do diretório a nomenclatura que achar
necessária: '...\\IMG_' ou '...\\SAIDA_' etc#
35. outputRaster_2 =
'C:\\00_MESTRADO_SOLOS\\DISSERTACAO\\BASES\\RASTERS\\AQUA_MODI
S\\tiff\\IMG_'+ outputName_2
36. gdal.Warp(outputRaster_2,rlayer_2,dstSRS='EPSG:4674')

37. # Adicionar a saída ao mapa#
38. iface.addRasterLayer(outputRaster_2, outputName_2)

39. ## Abrir a camada rasters de interesse
(Water_Vapor_Correction_Factors -> [20]) no HDF#
40. # Para selecionar o produto que se quer exportar altera-
se: GetSubDatasets()[20][0]#
41. rlayer_3 = gdal.Open(hdflayer.GetSubDatasets()[20][0],
gdal.GA_ReadOnly)

42. # Definir o produto de saída e projeção#
43. # Altera-se o final do nome original do arquivo .hdf para
identificar o produto exportado#
44. # Altere: ['LOCALGRANULEID'][:-4]+'_20.tif'#
45. outputName_3 =
rlayer_3.GetMetadata_Dict()['LOCALGRANULEID'][:-4]+'_20.tiff'
46. # Altera-se o início do nome original do arquivo .hdf#
47. # Insira no final do diretório a nomenclatura que achar
necessária: '...\\IMG_' ou '...\\SAIDA_' etc#
48. outputRaster_3 =
'C:\\00_MESTRADO_SOLOS\\DISSERTACAO\\BASES\\RASTERS\\AQUA_MODI
S\\tiff\\IMG_'+ outputName_3

```

```

49. gdal.Warp(outputRaster_3,rlayer_3,dstSRS='EPSG:4674')
50. # Adicionar a saída ao mapa#
51. iface.addRasterLayer(outputRaster_3, outputName_3)

52. #Fim#

```

Para executar o *script* é necessário separar cada imagem MYD05 do dia avaliado em uma pasta separada (conforme linha 5: “...\hdf (1)”; ...\\hdf (2)”...). Além disso, é preciso adequar os diretórios (linhas: 5, 22, 35 e 48) do *script* à respectiva pasta onde o usuário for executar o processamento das imagens.

A imagem de W_p foi calculada na calculadora *raster* do Qgis. O cálculo algébrico das imagens é feito para que cada pixel da imagem resultante (W_p) seja transformada na unidade centímetro (*cm*) de coluna de água precipitável. A equação utilizada foi:

$$W_p = \frac{\text{Water Vapor Near Infrared [19]}}{\text{Water Vapor Correction Factors [20]}}$$

Adiciona-se os valores de vapor d’água precipitável da imagem MYD05 para os pontos das estações meteorológicas das mesmas imagens. Para que cada imagem (W_p) correspondesse ao dado *shapefile* (ponto) da estação meteorológica (Tm_{EM}) de mesma data, organizou-se o banco de dados com nome do arquivos iniciando pela data de aquisição, facilitado a correspondência entre imagem e pontos obtidos na mesma data. Para adicionar o valor W_p da imagem ao ponto, utilizou-se a ferramenta “*Add raster values to points*”.

APÊNDICE 2 – DADOS MEDIDOS EM ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS E COM SENSORIAMENTO REMOTO, PARA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DAS VARIÁVEIS URe_{SR} E ETo ESTIMADA

TABELA A2.1 – DADOS MEDIDOS EM ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS ($Tmin_{EM}$; $Tmax_{EM}$; Tm_{EM} ; URm_{EM} ; $u_{m_{EM}}$; Rs e Ra) E COM SENSORIAMENTO REMOTO (Ts e Wp), PARA CALIBRAÇÃO DAS VARIÁVEIS $T_{e_{SR}}$ E URe_{SR} , COM OS MODELOS LINEARES SIMPLES E MÚLTIPLOS, E ESTIMATIVA DA ETo_{PM} COM DADOS MEDIDOS EM ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS, NO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO.

Estação	Passagem MODIS horário	Cena Landsat	Dia Juliano dia	Passagem do Landsat data	Ts ---- °C ----	Tm_{EM} ---- °C ----	Wp cm	URm_{EM} %	$Tmin_{EM}$ ---- °C ----	$Tmax_{EM}$ ---- °C ----	$u_{m_{EM}}$ m s ⁻¹	Rs - MJ m ⁻² dia ⁻¹ -	Ra - MJ m ⁻² dia ⁻¹ -	Ra -- mm dia ⁻¹ --	ETo_{PM}
FPO-IPR	17:05:00	221078	37	06/02/2014	25,59	26,20	2,91	56,60	21,60	33,80	0,52	22,91	40,99	16,73	4,83
			181	30/06/2014	13,83	9,10	0,71	65,60	5,20	16,80	2,15	11,58	21,26	8,68	1,87
			213	01/08/2014	19,10	17,40	2,74	79,70	10,30	26,80	1,23	15,79	24,30	9,92	2,52
			56	25/02/2015	18,61	20,80	3,76	79,10	14,80	29,50	1,04	23,66	38,57	15,74	4,49
			216	04/08/2015	19,19	17,80	2,05	67,20	12,40	27,70	0,80	15,49	24,76	10,10	2,53
			280	07/10/2015	24,74	20,80	2,42	69,40	14,00	31,60	1,01	24,75	36,87	15,05	4,75
LDA-IPR	17:10:00	222076	28	28/01/2014	24,31	25,80	4,66	62,40	18,50	32,20	2,18	27,04	41,66	17,00	5,98
			124	04/05/2014	17,82	20,80	3,16	72,10	14,20	27,00	1,98	15,55	26,62	10,87	3,01
			236	24/08/2014	28,13	23,40	2,11	36,80	12,80	32,20	1,97	17,05	29,19	11,91	4,39
			31	31/01/2015	18,96	23,60	5,57	75,90	18,90	29,20	2,44	20,31	41,44	16,91	4,45
			223	11/08/2015	25,44	21,40	2,62	57,60	14,00	29,40	2,22	15,26	26,88	10,97	3,60
			287	14/10/2015	29,24	26,20	4,61	58,40	17,80	32,80	1,75	17,26	38,22	15,60	4,38
CAS-IMT	17:05:00	221077	37	06/02/2014	30,41	23,88	3,60	69,42	22,93	24,95	0,50	9,32	40,98	16,73	2,29
			181	30/06/2014	13,60	11,20	0,66	74,08	10,69	11,80	3,57	3,62	21,52	8,78	1,30
			213	01/08/2014	19,51	15,02	2,59	79,25	14,25	15,80	1,09	4,89	24,54	10,02	1,12
			40	09/02/2015	27,13	21,68	4,03	78,83	20,80	22,53	0,51	8,55	40,67	16,60	1,97
			216	04/08/2015	21,87	16,48	1,31	73,33	15,38	17,40	0,53	5,67	25,00	10,20	1,25
			280	07/10/2015	27,83	19,88	2,75	73,21	19,06	20,52	1,38	7,15	36,95	15,08	1,88

Sendo: FPO-IPR – Fernandes Pinheiro (IAPAR); LDA-IPR – Londrina (IAPAR); CAS-IMT – Castro (INMET); NFT-IMT – Nova Fátima (INMET); VTN-IMT – Ventania (INMET); FPO-SIM – Fernandes Pinheiro (SIMEPAR); PGA-SIM – Ponta Grossa (SIMEPAR); TBA-SIM – Telêmaco Borba (SIMEPAR); Ts – temperatura da superfície do solo estimada da banda 10 do satélite Landsat (°C); Tm_{EM} – Temperatura média do ar medida em estação meteorológica (°C); Wp – Coluna total de vapor d'água precipitável (cm); URm_{EM} – Umidade relativa média do ar medida em estação meteorológica (%); $Tmin_{EM}$ – Temperatura mínima do ar medida em estação meteorológica (°C); $Tmax_{EM}$ – Temperatura máxima do ar medida em estação meteorológica (°C); $u_{m_{EM}}$ – velocidade média diária do vento a dez metros de altura (m s⁻¹); Rs – radiação solar incidente (MJ m⁻² dia⁻¹); Ra – radiação solar no topo da atmosfera (MJ m⁻² dia⁻¹ e mm dia⁻¹); ETo_{PM} – evapotranspiração de referência calculada com o modelo Penman-Monteith ASCE (mm dia⁻¹).

Continuação: TABELA A2.1 – DADOS MEDIDOS EM ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS ($T_{min_{EM}}$; $T_{max_{EM}}$; $T_{m_{EM}}$; $UR_{m_{EM}}$; $u_{m_{EM}}$; R_s e R_a) E COM SENSORIAMENTO REMOTO (T_s e W_p), PARA **CALIBRAÇÃO** DAS VARIÁVEIS $T_{e_{SR}}$ E $UR_{e_{SR}}$, COM OS MODELOS LINEARES SIMPLES E MÚLTIPLOS, E ESTIMATIVA DA $ET_{o_{PM}}$ COM DADOS MEDIDOS EM ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS, NO PERÍODO DE **CALIBRAÇÃO**.

Estação	Passagem MODIS horário	Cena Landsat	Dia Juliano dia	Passagem do Landsat data	T_s ---- °C ----	$T_{m_{EM}}$	W_p cm	$UR_{m_{EM}}$ %	$T_{min_{EM}}$ ---- °C ----	$T_{max_{EM}}$	$u_{m_{EM}}$ m s ⁻¹	R_s - MJ m ⁻² dia ⁻¹ -	R_a -- mm dia ⁻¹ --	R_a	$ET_{o_{PM}}$
NFT-IMT	17:10:00	222076	28	28/01/2014	27,13	23,80	3,43	75,92	22,95	24,52	2,35	8,36	41,67	17,01	2,46
			124	04/05/2014	22,78	20,60	2,19	73,75	19,83	21,26	1,26	5,07	26,53	10,83	1,44
			236	24/08/2014	27,35	23,73	2,15	41,42	22,83	24,52	2,59	6,06	29,11	11,88	3,35
			31	31/01/2015	23,56	22,39	2,63	79,67	21,76	23,10	4,51	7,66	41,45	16,92	2,45
			223	11/08/2015	25,71	22,23	2,30	59,14	21,50	23,07	3,25	5,36	26,79	10,93	2,74
			287	14/10/2015	25,15	23,47	4,76	73,50	22,71	23,96	3,55	6,85	38,20	15,59	2,52
VTN-IMT	17:05:00	221077	37	06/02/2014	25,85	24,70	3,78	57,67	23,85	25,55	3,30	8,55	40,97	16,72	3,59
			181	30/06/2014	12,60	10,03	0,59	79,92	9,60	10,47	3,48	3,26	21,80	8,90	1,00
			213	01/08/2014	19,20	17,76	2,66	67,38	17,22	18,23	2,62	3,98	24,79	10,12	1,68
			40	09/02/2015	26,06	21,43	3,97	77,54	20,74	22,15	3,39	7,73	40,66	16,60	2,35
			216	04/08/2015	23,03	20,26	2,39	51,75	19,68	20,93	2,22	4,50	25,25	10,30	2,22
			280	07/10/2015	26,86	20,13	2,80	67,08	19,18	20,87	4,38	7,71	37,03	15,11	2,93
FPO-SIM	17:05:00	221078	37	06/02/2014	28,83	25,74	2,92	62,50	18,40	34,10	0,52	25,99	40,99	16,73	5,26
			181	30/06/2014	11,22	9,98	0,97	72,27	4,20	16,60	2,15	11,92	21,15	8,63	1,74
			213	01/08/2014	17,18	17,20	2,54	79,82	8,70	25,80	1,23	16,01	24,20	9,88	2,45
			56	25/02/2015	12,32	20,53	3,80	82,92	13,70	29,50	1,04	24,51	38,54	15,73	4,56
			216	04/08/2015	20,38	18,67	2,60	70,27	12,40	27,50	0,80	15,33	24,66	10,07	2,49
			280	07/10/2015	25,65	21,75	2,53	72,55	13,60	31,80	1,01	25,14	36,84	15,03	4,80

Sendo: FPO-IPR – Fernandes Pinheiro (IAPAR); LDA-IPR – Londrina (IAPAR); CAS-IMT – Castro (INMET); NFT-IMT – Nova Fátima (INMET); VTN-IMT – Ventania (INMET); FPO-SIM – Fernandes Pinheiro (SIMEPAR); PGA-SIM – Ponta Grossa (SIMEPAR); TBA-SIM – Telêmaco Borba (SIMEPAR); T_s – temperatura da superfície do solo estimada da banda 10 do satélite Landsat (°C); $T_{m_{EM}}$ – Temperatura média do ar medida em estação meteorológica (°C); W_p – Coluna total de vapor d'água precipitável (cm); $UR_{m_{EM}}$ – Umidade relativa média do ar medida em estação meteorológica (%); $T_{min_{EM}}$ – Temperatura mínima do ar medida em estação meteorológica (°C); $T_{max_{EM}}$ – Temperatura máxima do ar medida em estação meteorológica (°C); $u_{m_{EM}}$ – velocidade média diária do vento a dez metros de altura (m s⁻¹); R_s – radiação solar incidente (MJ m⁻² dia⁻¹); R_a – radiação solar no topo da atmosfera (MJ m⁻² dia⁻¹ e mm dia⁻¹); $ET_{o_{PM}}$ – evapotranspiração de referência calculada com o modelo Penman-Monteith ASCE (mm dia⁻¹).

Continuação: TABELA A2.1 – DADOS MEDIDOS EM ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS ($T_{min_{EM}}$; $T_{max_{EM}}$; $T_{m_{EM}}$; $UR_{m_{EM}}$; $u_{m_{EM}}$; R_s e R_a) E COM SENSORIAMENTO REMOTO (T_s e W_p), PARA **CALIBRAÇÃO** DAS VARIÁVEIS $T_{e_{SR}}$ E $UR_{e_{SR}}$, COM OS MODELOS LINEARES SIMPLES E MÚLTIPLOS, E ESTIMATIVA DA $ET_{o_{PM}}$ COM DADOS MEDIDOS EM ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS, NO PERÍODO DE **CALIBRAÇÃO**.

Estação	Passagem MODIS Horário	Cena Landsat	Dia Juliano dia	Passagem do Landsat data	T_s ---- °C ----	$T_{m_{EM}}$ ---- °C ----	W_p cm	$UR_{m_{EM}}$ %	$T_{min_{EM}}$ ---- °C ----	$T_{max_{EM}}$ ---- °C ----	$u_{m_{EM}}$ m s ⁻¹	R_s - MJ m ⁻² dia ⁻¹ -	R_a - MJ m ⁻² dia ⁻¹ -	R_a -- mm dia ⁻¹ --	$ET_{o_{PM}}$
PGA-SIM	17:05:00	221077	37	06/02/2014	28,83	25,64	3,52	67,56	19,40	33,70	1,85	24,80	40,98	16,73	5,61
			181	30/06/2014	11,90	9,97	0,72	82,11	5,40	16,60	3,75	11,46	21,40	8,73	1,71
			213	01/08/2014	18,55	15,78	3,06	83,60	8,30	23,80	1,96	15,39	24,43	9,97	2,38
			40	09/02/2015	26,33	23,35	3,54	73,57	18,60	30,80	3,21	22,73	40,67	16,60	5,17
			216	04/08/2015	21,25	17,36	2,45	71,91	9,70	25,70	1,15	15,93	24,88	10,16	2,54
			280	07/10/2015	30,78	21,79	2,71	70,70	12,80	32,20	3,22	26,01	36,91	15,06	5,67
TBA-SIM	17:05:00	221077	37	06/02/2014	30,60	26,41	4,09	66,08	18,70	36,00	0,95	27,26	40,97	16,72	5,84
			181	30/06/2014	15,35	11,31	0,83	81,17	4,60	18,20	1,68	12,84	21,77	8,89	1,67
			213	01/08/2014	20,58	16,18	3,03	83,03	8,20	25,70	1,12	16,58	24,77	10,11	2,47
			40	09/02/2015	26,17	23,70	1,13	77,45	16,70	30,80	1,25	24,43	40,67	16,60	4,91
			216	04/08/2015	23,25	18,05	0,96	77,29	11,20	28,60	1,02	16,83	25,22	10,29	2,77
			280	07/10/2015	31,32	21,76	3,43	77,40	12,00	31,40	1,49	26,09	37,02	15,11	4,96

Sendo: FPO-IPR – Fernandes Pinheiro (IAPAR); LDA-IPR – Londrina (IAPAR); CAS-IMT – Castro (INMET); NFT-IMT – Nova Fátima (INMET); VTN-IMT – Ventania (INMET); FPO-SIM – Fernandes Pinheiro (SIMEPAR); PGA-SIM – Ponta Grossa (SIMEPAR); TBA-SIM – Telêmaco Borba (SIMEPAR); T_s – temperatura da superfície do solo estimada da banda 10 do satélite Landsat (°C); $T_{m_{EM}}$ – Temperatura média do ar medida em estação meteorológica (°C); W_p – Coluna total de vapor d'água precipitável (cm); $UR_{m_{EM}}$ – Umidade relativa média do ar medida em estação meteorológica (%); $T_{min_{EM}}$ – Temperatura mínima do ar medida em estação meteorológica (°C); $T_{max_{EM}}$ – Temperatura máxima do ar medida em estação meteorológica (°C); $u_{m_{EM}}$ – velocidade média diária do vento a dez metros de altura (m s⁻¹); R_s – radiação solar incidente (MJ m⁻² dia⁻¹); R_a – radiação solar no topo da atmosfera (MJ m⁻² dia⁻¹ e mm dia⁻¹); $ET_{o_{PM}}$ – evapotranspiração de referência calculada com o modelo Penman-Monteith ASCE (mm dia⁻¹).

TABELA A2.2 – DADOS MEDIDOS EM ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS ($T_{min_{EM}}$; $T_{max_{EM}}$; $T_{m_{EM}}$; $UR_{m_{EM}}$; $u_{m_{EM}}$; R_s e R_a) E COM SENSORIAMENTO REMOTO (T_s e Wp), PARA **VALIDAÇÃO** DAS VARIÁVEIS $T_{e_{SR}}$ E $UR_{e_{SR}}$, COM OS MODELOS LINEARES SIMPLES E MÚLTIPLOS, E ESTIMATIVA DA $ET_{o_{PM}}$ COM DADOS MEDIDOS EM ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS, NO PERÍODO DE **VALIDAÇÃO**.

Estação	Passagem MODIS horário	Cena Landsat	Dia Juliano dia	Passagem do Landsat data	T_s ---- °C ----	$T_{m_{EM}}$ ---- °C ----	Wp cm	$UR_{m_{EM}}$ %	$T_{min_{EM}}$ ---- °C ----	$T_{max_{EM}}$ ---- °C ----	$u_{m_{EM}}$ m s ⁻¹	R_s - MJ m ⁻² dia ⁻¹ -	R_a - MJ m ⁻² dia ⁻¹ -	R_a -- mm dia ⁻¹ --	$ET_{o_{PM}}$
FPO-IPR	17:05:00	221078	43	12/02/2016	19,93	22,30	4,36	74,60	17,00	28,30	1,10	21,69	40,32	16,46	4,30
			107	16/04/2016	25,76	22,50	4,69	78,70	18,00	31,60	0,77	17,01	28,84	11,77	3,27
			251	07/09/2016	19,66	10,40	0,77	60,70	2,40	19,80	1,98	20,92	31,34	12,79	3,22
			13	13/01/2017	25,01	21,00	2,66	75,80	14,20	29,50	1,03	26,76	42,75	17,45	5,12
			205	24/07/2017	18,40	15,60	1,64	69,80	8,80	26,00	0,75	15,40	23,20	9,47	2,23
			253	10/09/2017	24,50	20,30	2,00	59,00	12,50	30,60	1,18	21,61	31,74	12,96	4,06
			112	22/04/2018	26,02	19,90	3,78	66,00	14,10	27,80	0,80	16,49	27,84	11,37	2,88
			224	12/08/2018	21,28	13,60	1,26	69,80	6,40	22,30	1,07	16,65	26,09	10,65	2,43
LDA-IPR	17:10:00	222076	18	18/01/2016	25,91	23,00	3,09	64,20	16,00	29,20	4,17	22,74	42,25	17,24	5,58
			114	23/04/2016	30,86	26,30	4,42	53,30	19,20	32,80	1,37	15,59	28,38	11,58	3,59
			274	30/09/2016	29,19	21,30	3,07	51,60	14,00	28,80	2,50	19,98	36,22	14,78	4,79
			84	25/03/2017	32,22	25,20	0,94	65,20	19,50	32,00	1,08	19,81	34,14	13,94	4,13
			196	15/07/2017	18,86	19,20	1,81	50,00	13,00	26,20	2,44	15,51	23,31	9,52	3,38
			103	13/04/2018	29,90	23,40	3,64	61,70	17,20	29,80	1,41	16,72	30,47	12,43	3,53
			199	18/07/2018	26,11	20,90	2,36	51,60	13,60	28,80	1,59	13,67	23,60	9,63	2,93
343	09/12/2018	33,03	22,10	2,13	50,90	13,60	28,60	4,58	25,50	42,68	17,42	6,54			

Sendo: FPO-IPR – Fernandes Pinheiro (IAPAR); LDA-IPR – Londrina (IAPAR); CAS-IMT – Castro (INMET); NFT-IMT – Nova Fátima (INMET); VTN-IMT – Ventania (INMET); FPO-SIM – Fernandes Pinheiro (SIMEPAR); PGA-SIM – Ponta Grossa (SIMEPAR); TBA-SIM – Telêmaco Borba (SIMEPAR); T_s – temperatura da superfície do solo estimada da banda 10 do satélite Landsat (°C); $T_{m_{EM}}$ – Temperatura média do ar medida em estação meteorológica (°C); Wp – Coluna total de vapor d'água precipitável (cm); $UR_{m_{EM}}$ – Umidade relativa média do ar medida em estação meteorológica (%); $T_{min_{EM}}$ – Temperatura mínima do ar medida em estação meteorológica (°C); $T_{max_{EM}}$ – Temperatura máxima do ar medida em estação meteorológica (°C); $u_{m_{EM}}$ – velocidade média diária do vento a dez metros de altura (m s⁻¹); R_s – radiação solar incidente (MJ m⁻² dia⁻¹); R_a – radiação solar no topo da atmosfera (MJ m⁻² dia⁻¹ e mm dia⁻¹); $ET_{o_{PM}}$ – evapotranspiração de referência calculada com o modelo Penman-Monteith ASCE (mm dia⁻¹).

Continuação: TABELA A2.2 – DADOS MEDIDOS EM ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS ($T_{min_{EM}}$; $T_{max_{EM}}$; $T_{m_{EM}}$; $UR_{m_{EM}}$; $u_{m_{EM}}$; R_s e R_a) E COM SENSORIAMENTO REMOTO (T_s e W_p), PARA **VALIDAÇÃO** DAS VARIÁVEIS $T_{e_{SR}}$ E $UR_{e_{SR}}$, COM OS MODELOS LINEARES SIMPLES E MÚLTIPLOS, E ESTIMATIVA DA $ET_{o_{PM}}$ COM DADOS MEDIDOS EM ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS, NO PERÍODO DE **VALIDAÇÃO**.

Estação	Passagem MODIS horário	Cena Landsat	Dia Juliano dia	Passagem do Landsat data	T_s ---- °C ----	$T_{m_{EM}}$	W_p cm	$UR_{m_{EM}}$ %	$T_{min_{EM}}$ ---- °C ----	$T_{max_{EM}}$	$u_{m_{EM}}$ m s ⁻¹	R_s - MJ m ⁻² dia ⁻¹ -	R_a	R_a -- mm dia ⁻¹ --	$ET_{o_{PM}}$
CAS-IMT	17:05:00	221077	43	12/02/2016	25,00	24,47	3,95	63,60	23,23	25,30	1,86	9,28	40,33	16,46	2,91
			107	16/04/2016	22,78	21,95	4,31	81,21	21,19	22,53	0,22	5,39	29,04	11,85	1,20
			251	07/09/2016	18,04	10,55	0,66	66,46	9,94	11,28	2,30	5,85	31,51	12,86	1,58
			13	13/01/2017	27,95	20,39	3,34	75,46	19,65	21,26	1,43	8,66	42,69	17,42	2,18
			205	24/07/2017	18,99	12,91	1,28	72,38	11,75	14,00	0,85	5,62	23,45	9,57	1,20
			253	10/09/2017	27,34	19,30	1,87	66,92	18,38	20,42	1,07	7,29	31,91	13,02	1,91
			112	22/04/2018	21,73	16,93	3,39	74,92	16,16	17,85	0,91	5,84	28,06	11,45	1,38
			224	12/08/2018	17,96	10,40	1,19	77,25	9,36	11,45	0,61	6,10	26,32	10,74	1,14
NFT-IMT	17:10:00	222076	320	16/11/2018	30,29	21,85	2,53	70,71	21,02	22,58	2,20	8,35	41,80	17,06	2,49
			18	18/01/2016	26,24	21,83	2,20	70,33	21,23	22,48	5,14	7,59	42,27	17,25	3,06
			114	23/04/2016	27,32	25,54	4,21	61,21	24,93	26,35	2,86	5,39	28,29	11,55	2,71
			274	30/09/2016	24,95	18,97	0,97	64,13	18,27	19,88	5,73	7,34	36,18	14,77	3,27
			84	25/03/2017	27,05	24,66	2,04	64,92	23,82	25,44	2,27	6,94	34,09	13,91	2,58
			196	15/07/2017	16,86	18,64	1,73	62,08	18,05	19,41	3,50	4,32	23,21	9,47	2,28
			292	19/10/2017	28,97	25,85	0,76	49,92	25,10	27,05	3,77	8,69	38,89	15,87	4,39
			103	13/04/2018	25,57	23,15	3,15	61,42	22,30	24,10	2,22	6,52	30,39	12,40	2,51
199	18/07/2018	24,88	21,52	2,41	51,04	20,77	22,18	3,05	4,47	23,50	9,59	2,77			
343	09/12/2018	30,53	23,96	1,72	49,91	23,26	24,88	3,11	8,70	42,72	17,44	3,86			

Sendo: FPO-IPR – Fernandes Pinheiro (IAPAR); LDA-IPR – Londrina (IAPAR); CAS-IMT – Castro (INMET); NFT-IMT – Nova Fátima (INMET); VTN-IMT – Ventania (INMET); FPO-SIM – Fernandes Pinheiro (SIMEPAR); PGA-SIM – Ponta Grossa (SIMEPAR); TBA-SIM – Telêmaco Borba (SIMEPAR); T_s – temperatura da superfície do solo estimada da banda 10 do satélite Landsat (°C); $T_{m_{EM}}$ – Temperatura média do ar medida em estação meteorológica (°C); W_p – Coluna total de vapor d'água precipitável (cm); $UR_{m_{EM}}$ – Umidade relativa média do ar medida em estação meteorológica (%); $T_{min_{EM}}$ – Temperatura mínima do ar medida em estação meteorológica (°C); $T_{max_{EM}}$ – Temperatura máxima do ar medida em estação meteorológica (°C); $u_{m_{EM}}$ – velocidade média diária do vento a dez metros de altura (m s⁻¹); R_s – radiação solar incidente (MJ m⁻² dia⁻¹); R_a – radiação solar no topo da atmosfera (MJ m⁻² dia⁻¹ e mm dia⁻¹); $ET_{o_{PM}}$ – evapotranspiração de referência calculada com o modelo Penman-Monteith ASCE (mm dia⁻¹).

Continuação: TABELA A2.2 – DADOS MEDIDOS EM ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS ($T_{min_{EM}}$; $T_{max_{EM}}$; $T_{m_{EM}}$; $UR_{m_{EM}}$; $u_{m_{EM}}$; R_s e R_a) E COM SENSORIAMENTO REMOTO (T_s e Wp), PARA **VALIDAÇÃO** DAS VARIÁVEIS $T_{e_{SR}}$ E $UR_{e_{SR}}$, COM OS MODELOS LINEARES SIMPLES E MÚLTIPLOS, E ESTIMATIVA DA $ET_{o_{PM}}$ COM DADOS MEDIDOS EM ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS, NO PERÍODO DE **VALIDAÇÃO**.

Estação	Passagem MODIS horário	Cena Landsat	Dia Juliano dia	Passagem do Landsat data	T_s ---- °C ----	$T_{m_{EM}}$	Wp cm	$UR_{m_{EM}}$ %	$T_{min_{EM}}$ ---- °C ----	$T_{max_{EM}}$	$u_{m_{EM}}$ m s ⁻¹	R_s - MJ m ⁻² dia ⁻¹ -	R_a - MJ m ⁻² dia ⁻¹ -	R_a -- mm dia ⁻¹ --	$ET_{o_{PM}}$
VTN-IMT	17:05:00	221077	43	12/02/2016	21,19	20,50	4,45	78,88	20,07	21,09	3,19	6,52	40,34	16,47	1,99
			107	16/04/2016	25,91	23,40	4,09	67,13	22,78	23,92	2,88	5,01	29,25	11,94	2,24
			251	07/09/2016	15,88	9,80	0,52	72,04	9,17	10,38	4,17	5,57	31,68	12,93	1,62
			13	13/01/2017	27,73	20,20	3,80	76,25	19,33	20,92	3,13	8,59	42,62	17,39	2,44
			205	24/07/2017	20,57	16,39	1,35	60,50	15,91	16,87	4,38	3,71	23,72	9,68	2,32
			253	10/09/2017	26,30	21,46	1,81	47,00	20,94	22,06	4,61	5,42	32,08	13,09	3,82
			112	22/04/2018	23,02	19,81	1,67	57,58	19,04	20,52	2,52	5,51	28,29	11,54	2,34
			224	12/08/2018	18,98	14,70	1,08	60,58	13,91	15,43	2,77	5,25	26,56	10,84	1,99
320	16/11/2018	30,14	21,12	1,43	77,54	20,39	21,97	3,63	8,40	41,76	17,04	2,49			
FPO-SIM	17:05:00	221078	43	12/02/2016	21,53	22,09	3,53	79,76	16,70	28,10	1,10	21,78	40,32	16,46	4,25
			107	16/04/2016	23,04	23,68	4,65	77,53	17,50	31,30	0,77	17,09	28,76	11,74	3,25
			251	07/09/2016	15,39	10,28	0,71	68,33	2,40	19,60	1,98	20,75	31,27	12,76	3,07
			13	13/01/2017	25,84	21,32	2,62	73,52	14,20	29,50	1,03	26,77	42,78	17,46	5,13
			205	24/07/2017	17,92	16,19	1,75	74,28	8,70	26,00	0,75	15,38	23,10	9,43	2,21
			253	10/09/2017	25,74	21,38	2,08	61,23	12,50	30,90	1,18	21,74	31,68	12,93	4,08
			112	22/04/2018	21,76	19,92	3,72	71,88	13,90	27,80	0,80	16,56	27,76	11,33	2,86
			224	12/08/2018	17,44	13,58	1,23	71,20	6,40	22,30	1,07	16,59	26,00	10,61	2,41
352	18/12/2018	28,74	24,41	2,67	74,46	18,40	33,90	1,38	27,24	43,24	17,65	5,84			

Sendo: FPO-IPR – Fernandes Pinheiro (IAPAR); LDA-IPR – Londrina (IAPAR); CAS-IMT – Castro (INMET); NFT-IMT – Nova Fátima (INMET); VTN-IMT – Ventania (INMET); FPO-SIM – Fernandes Pinheiro (SIMEPAR); PGA-SIM – Ponta Grossa (SIMEPAR); TBA-SIM – Telêmaco Borba (SIMEPAR); T_s – temperatura da superfície do solo estimada da banda 10 do satélite Landsat (°C); $T_{m_{EM}}$ – Temperatura média do ar medida em estação meteorológica (°C); Wp – Coluna total de vapor d'água precipitável (cm); $UR_{m_{EM}}$ – Umidade relativa média do ar medida em estação meteorológica (%); $T_{min_{EM}}$ – Temperatura mínima do ar medida em estação meteorológica (°C); $T_{max_{EM}}$ – Temperatura máxima do ar medida em estação meteorológica (°C); $u_{m_{EM}}$ – velocidade média diária do vento a dez metros de altura (m s⁻¹); R_s – radiação solar incidente (MJ m⁻² dia⁻¹); R_a – radiação solar no topo da atmosfera (MJ m⁻² dia⁻¹ e mm dia⁻¹); $ET_{o_{PM}}$ – evapotranspiração de referência calculada com o modelo Penman-Monteith ASCE (mm dia⁻¹).

Continuação: TABELA A2.2 – DADOS MEDIDOS EM ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS ($T_{min_{EM}}$; $T_{max_{EM}}$; $T_{m_{EM}}$; $UR_{m_{EM}}$; $u_{m_{EM}}$; R_s e R_a) E COM SENSORIAMENTO REMOTO (T_s e W_p), PARA **VALIDAÇÃO** DAS VARIÁVEIS $T_{e_{SR}}$ E $UR_{e_{SR}}$, COM OS MODELOS LINEARES SIMPLES E MÚLTIPLOS, E ESTIMATIVA DA $ET_{o_{PM}}$ COM DADOS MEDIDOS EM ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS, NO PERÍODO DE **VALIDAÇÃO**.

Estação	Passagem MODIS Horário	Cena Landsat	Dia Juliano dia	Passagem do Landsat data	T_s ---- °C ----	$T_{m_{EM}}$ ---- °C ----	W_p cm	$UR_{m_{EM}}$ %	$T_{min_{EM}}$ ---- °C ----	$T_{max_{EM}}$ ---- °C ----	$u_{m_{EM}}$ m s ⁻¹	R_s - MJ m ⁻² dia ⁻¹ -	R_a - MJ m ⁻² dia ⁻¹ -	R_a -- mm dia ⁻¹ --	$ET_{o_{PM}}$
PGA-SIM	17:05:00	221077	43	12/02/2016	22,17	21,54	3,64	77,47	17,00	27,30	3,28	20,71	40,33	16,46	4,35
			107	16/04/2016	24,62	23,47	3,50	75,45	19,10	30,30	1,96	15,50	28,94	11,81	3,37
			251	07/09/2016	18,64	9,89	0,72	70,29	3,10	17,60	2,38	19,15	31,43	12,83	2,84
			13	13/01/2017	29,35	21,93	2,88	70,38	14,70	29,70	2,27	26,47	42,72	17,44	5,45
			205	24/07/2017	20,40	16,17	1,56	66,59	10,30	25,60	2,87	14,60	23,34	9,52	3,02
			253	10/09/2017	27,96	21,45	1,96	56,02	14,60	29,90	3,17	19,92	31,83	12,99	4,89
			112	22/04/2018	24,68	18,95	3,72	67,42	12,70	25,00	2,77	15,69	27,96	11,41	3,28
			224	12/08/2018	18,38	12,35	1,34	70,76	4,10	22,50	2,12	17,99	26,21	10,70	2,83
TBA-SIM	17:05:00	221077	320	16/11/2018	33,56	21,68	2,67	69,83	16,40	29,90	4,90	24,59	41,82	17,07	5,79
			43	12/02/2016	26,49	24,02	4,64	74,16	18,70	30,40	1,28	22,08	40,34	16,46	4,60
			107	16/04/2016	26,36	23,50	4,48	78,56	16,80	32,20	1,15	18,35	29,23	11,93	3,59
			251	07/09/2016	20,88	11,63	0,71	69,69	4,40	20,30	1,77	20,20	31,66	12,92	3,06
			13	13/01/2017	30,30	23,14	1,46	72,58	14,70	32,10	1,38	28,45	42,63	17,40	5,72
			205	24/07/2017	21,05	14,95	1,87	75,45	6,30	25,40	1,32	16,56	23,69	9,67	2,47
			253	10/09/2017	28,27	20,69	2,13	62,13	11,60	30,60	1,96	22,36	32,06	13,08	4,51
			112	22/04/2018	25,00	19,62	3,55	74,43	11,50	29,10	0,99	18,97	28,26	11,53	3,24
224	12/08/2018	19,67	12,71	1,38	78,73	3,80	24,40	0,87	19,27	26,53	10,83	2,64			
320	16/11/2018	33,13	24,62	2,61	67,63	17,70	34,00	1,85	26,98	41,76	17,05	5,96			

Sendo: FPO-IPR – Fernandes Pinheiro (IAPAR); LDA-IPR – Londrina (IAPAR); CAS-IMT – Castro (INMET); NFT-IMT – Nova Fátima (INMET); VTN-IMT – Ventania (INMET); FPO-SIM – Fernandes Pinheiro (SIMEPAR); PGA-SIM – Ponta Grossa (SIMEPAR); TBA-SIM – Telêmaco Borba (SIMEPAR); T_s – temperatura da superfície do solo estimada da banda 10 do satélite Landsat (°C); $T_{m_{EM}}$ – Temperatura média do ar medida em estação meteorológica (°C); W_p – Coluna total de vapor d'água precipitável (cm); $UR_{m_{EM}}$ – Umidade relativa média do ar medida em estação meteorológica (%); $T_{min_{EM}}$ – Temperatura mínima do ar medida em estação meteorológica (°C); $T_{max_{EM}}$ – Temperatura máxima do ar medida em estação meteorológica (°C); $u_{m_{EM}}$ – velocidade média diária do vento a dez metros de altura (m s⁻¹); R_s – radiação solar incidente (MJ m⁻² dia⁻¹); R_a – radiação solar no topo da atmosfera (MJ m⁻² dia⁻¹ e mm dia⁻¹); $ET_{o_{PM}}$ – evapotranspiração de referência calculada com o modelo Penman-Monteith ASCE (mm dia⁻¹).

TABELA A2.3 – VARIÁVEIS ESTIMADAS COM DADOS MEDIDOS EM ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS E COM SENSORIAMENTO REMOTO, NO PERÍODO DE **VALIDAÇÃO**.

Estação	Passagem MODIS horário	Cena Landsat	Dia Juliano dia	Passagem Landsat data	T_{eSR} (Wp, Ts) °C	UR_{eSR} (w_p, T_s) %	ET_{o_c}	$ET_{o_{TW.dc}}$	$ET_{o_{MJS}}$ ($\psi_{ar}; Ra$)
							----- $mm\ dia^{-1}$ -----		
FPO-IPR	17:05:00	221078	43	12/02/2016	21,33	76,10	3,51	3,24	3,03
			107	16/04/2016	24,97	71,03	2,94	3,80	2,48
			251	07/09/2016	14,91	70,11	1,91	1,52	2,71
			13	13/01/2017	21,03	68,21	3,67	3,28	3,97
			205	24/07/2017	15,77	72,85	1,49	1,54	1,85
			253	10/09/2017	19,60	67,56	2,54	2,52	2,96
			112	22/04/2018	23,51	69,19	2,67	3,37	2,50
			224	12/08/2018	16,63	69,41	1,77	1,75	2,29
LDA-IPR	17:10:00	222076	18	18/01/2016	22,25	68,09	3,84	3,24	3,94
			114	23/04/2016	27,18	65,60	3,15	4,50	2,82
			274	30/09/2016	23,93	64,87	3,54	3,58	3,66
			84	25/03/2017	21,80	58,23	3,04	2,77	4,02
			196	15/07/2017	16,32	72,70	1,55	1,22	1,87
			103	13/04/2018	25,31	65,18	3,15	3,86	3,05
			199	18/07/2018	21,07	66,62	2,03	2,30	2,24
			343	09/12/2018	24,31	59,53	4,24	4,07	4,93

Sendo: FPO-IPR – Fernandes Pinheiro (IAPAR); LDA-IPR – Londrina (IAPAR); CAS-IMT – Castro (INMET); NFT-IMT – Nova Fátima (INMET); VTN-IMT – Ventania (INMET); FPO-SIM – Fernandes Pinheiro (SIMEPAR); PGA-SIM – Ponta Grossa (SIMEPAR); TBA-SIM – Telêmaco Borba (SIMEPAR); $T_{eSR}(Wp, Ts)$ – temperatura do ar estimada com sensoriamento remoto por ajuste linear múltiplo (°C); (%); $UR_{eSR}(w_p, T_s)$ – umidade relativa do ar estimada com sensoriamento remoto com ajuste linear múltiplo (%); ET_{o_c} – evapotranspiração de referência estimada com o modelo de Camargo (1971) ($mm\ dia^{-1}$); $ET_{o_{TW.mc}}$ – evapotranspiração de referência corrigida para um m -ésimo mês de ND dias e N horas de fotoperíodo, estimada com o modelo de Thornthwaite ($mm\ mês^{-1}$); ND número de dias do m -ésimo mês (dias); $ET_{o_{MJS}}(\psi_{ar}; Ra)$ – evapotranspiração de referência estimada com o modelo Moretti-Jerszurki-Silva ($mm\ dia^{-1}$).

Continuação: TABELA A2.3 – VARIÁVEIS ESTIMADAS COM DADOS MEDIDOS EM ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS E COM SENSORIAMENTO REMOTO, NO PERÍODO DE **VALIDAÇÃO**.

Estação	Passagem MODIS horário	Cena Landsat	Dia Juliano dia	Passagem Landsat data	T_{eSR} (Wp, Ts)	UR_{eSR} (wp, Ts)	ET_{o_c}	$ET_{o_{TW.dc}}$	$ET_{o_{MJS}}$ ($\Psi_{ar}; Ra$)
					°C	%	----- $mm\ dia^{-1}$ -----		
CAS-IMT	17:05:00	221077	43	12/02/2016	23,27	70,47	3,83	3,86	3,55
			107	16/04/2016	22,75	73,26	2,70	3,27	2,34
			251	07/09/2016	13,87	71,50	1,78	1,45	2,62
			13	13/01/2017	23,76	66,56	4,14	4,16	4,16
			205	24/07/2017	15,45	71,65	1,48	1,60	1,93
			253	10/09/2017	20,87	64,59	2,72	2,92	3,22
			112	22/04/2018	20,59	72,68	2,36	2,74	2,29
			224	12/08/2018	14,76	72,49	1,59	1,53	2,12
NFT-IMT	17:10:00	222076	320	16/11/2018	23,57	62,87	4,02	4,06	4,45
			18	18/01/2016	20,87	66,22	3,60	2,77	3,55
			114	23/04/2016	24,94	68,66	2,88	3,65	2,39
			274	30/09/2016	18,04	65,34	2,66	1,79	2,66
			84	25/03/2017	21,02	65,16	2,92	2,53	4,14
			196	15/07/2017	15,13	74,50	1,43	1,01	1,99
			292	19/10/2017	19,78	61,08	3,14	2,32	3,26
			103	13/04/2018	22,18	68,52	2,75	2,79	2,34
			199	18/07/2018	20,51	67,90	1,97	2,15	2,18
			343	09/12/2018	22,28	61,24	3,89	3,29	4,44

Sendo: FPO-IPR – Fernandes Pinheiro (IAPAR); LDA-IPR – Londrina (IAPAR); CAS-IMT – Castro (INMET); NFT-IMT – Nova Fátima (INMET); VTN-IMT – Ventania (INMET); FPO-SIM – Fernandes Pinheiro (SIMEPAR); PGA-SIM – Ponta Grossa (SIMEPAR); TBA-SIM – Telêmaco Borba (SIMEPAR); $T_{eSR}(Wp, Ts)$ – temperatura do ar estimada com sensoriamento remoto por ajuste linear múltiplo (°C); $UR_{eSR}(wp, Ts)$ – umidade relativa do ar estimada com sensoriamento remoto com ajuste linear múltiplo (%); ET_{o_c} – evapotranspiração de referência estimada com o modelo de Camargo (1971) ($mm\ dia^{-1}$); $ET_{o_{TW.mc}}$ – evapotranspiração de referência corrigida para um m -ésimo mês de ND dias e N horas de fotoperíodo, estimada com o modelo de Thornthwaite ($mm\ mês^{-1}$); ND número de dias do m -ésimo mês (dias); $ET_{o_{MJS}}(\Psi_{ar}; Ra)$ – evapotranspiração de referência estimada com o modelo Moretti-Jerszurki-Silva ($mm\ dia^{-1}$).

Continuação: TABELA A2.3 – VARIÁVEIS ESTIMADAS COM DADOS MEDIDOS EM ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS E COM SENSORIAMENTO REMOTO, NO PERÍODO DE **VALIDAÇÃO**.

Estação	Passagem MODIS horário	Cena Landsat	Dia Juliano dia	Passagem Landsat data	T_{eSR} (W_p, T_s) °C	UR_{eSR} (w_p, T_s) %	ET_{o_c}	$ET_{o_{TW.dc}}$	$ET_{o_{MJS}}$ ($\psi_{ar}; Ra$)
							----- $mm\ dia^{-1}$ -----		
VTN-IMT	17:05:00	221077	43	12/02/2016	22,15	75,04	3,65	3,55	3,13
			107	16/04/2016	23,99	69,83	2,86	3,59	2,59
			251	07/09/2016	12,49	73,34	1,61	1,22	2,50
			13	13/01/2017	24,45	67,57	4,25	4,36	4,05
			205	24/07/2017	16,40	70,24	1,59	1,78	2,03
			253	10/09/2017	20,21	65,49	2,65	2,77	3,16
			112	22/04/2018	18,25	68,43	2,11	2,23	2,56
			224	12/08/2018	15,09	71,31	1,64	1,59	2,21

FPO-SIM	17:05:00	221078	320	16/11/2018	21,57	61,11	3,68	3,48	4,62
			43	12/02/2016	20,72	73,10	3,41	3,07	3,29
			107	16/04/2016	23,47	73,58	2,75	3,39	2,30
			251	07/09/2016	12,57	74,17	1,61	1,11	2,42
			13	13/01/2017	21,38	67,33	3,73	3,38	4,06
			205	24/07/2017	15,71	73,51	1,48	1,53	1,81
			253	10/09/2017	20,40	66,50	2,64	2,71	3,04
			112	22/04/2018	21,18	73,22	2,40	2,78	2,23

FPO-SIM	17:05:00	221078	224	12/08/2018	14,56	73,07	1,55	1,37	2,06
			352	18/12/2018	23,00	64,62	4,06	3,91	4,41

Sendo: FPO-IPR – Fernandes Pinheiro (IAPAR); LDA-IPR – Londrina (IAPAR); CAS-IMT – Castro (INMET); NFT-IMT – Nova Fátima (INMET); VTN-IMT – Ventania (INMET); FPO-SIM – Fernandes Pinheiro (SIMEPAR); PGA-SIM – Ponta Grossa (SIMEPAR); TBA-SIM – Telêmaco Borba (SIMEPAR); $T_{eSR}(W_p; T_s)$ – temperatura do ar estimada com sensoriamento remoto por ajuste linear múltiplo (°C); $UR_{eSR}(w_p; T_s)$ – umidade relativa do ar estimada com sensoriamento remoto com ajuste linear múltiplo (%); ET_{o_c} – evapotranspiração de referência estimada com o modelo de Camargo (1971) ($mm\ dia^{-1}$); $ET_{o_{TW.mc}}$ – evapotranspiração de referência corrigida para um m -ésimo mês de ND dias e N horas de fotoperíodo, estimada com o modelo de Thornthwaite ($mm\ mês^{-1}$); ND número de dias do m -ésimo mês (dias); $ET_{o_{MJS}}(\psi_{ar}; Ra)$ – evapotranspiração de referência estimada com o modelo Moretti-Jerszurki-Silva ($mm\ dia^{-1}$).

Continuação: TABELA A2.3 – VARIÁVEIS ESTIMADAS COM DADOS MEDIDOS EM ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS E COM SENSORIAMENTO REMOTO, NO PERÍODO DE **VALIDAÇÃO**.

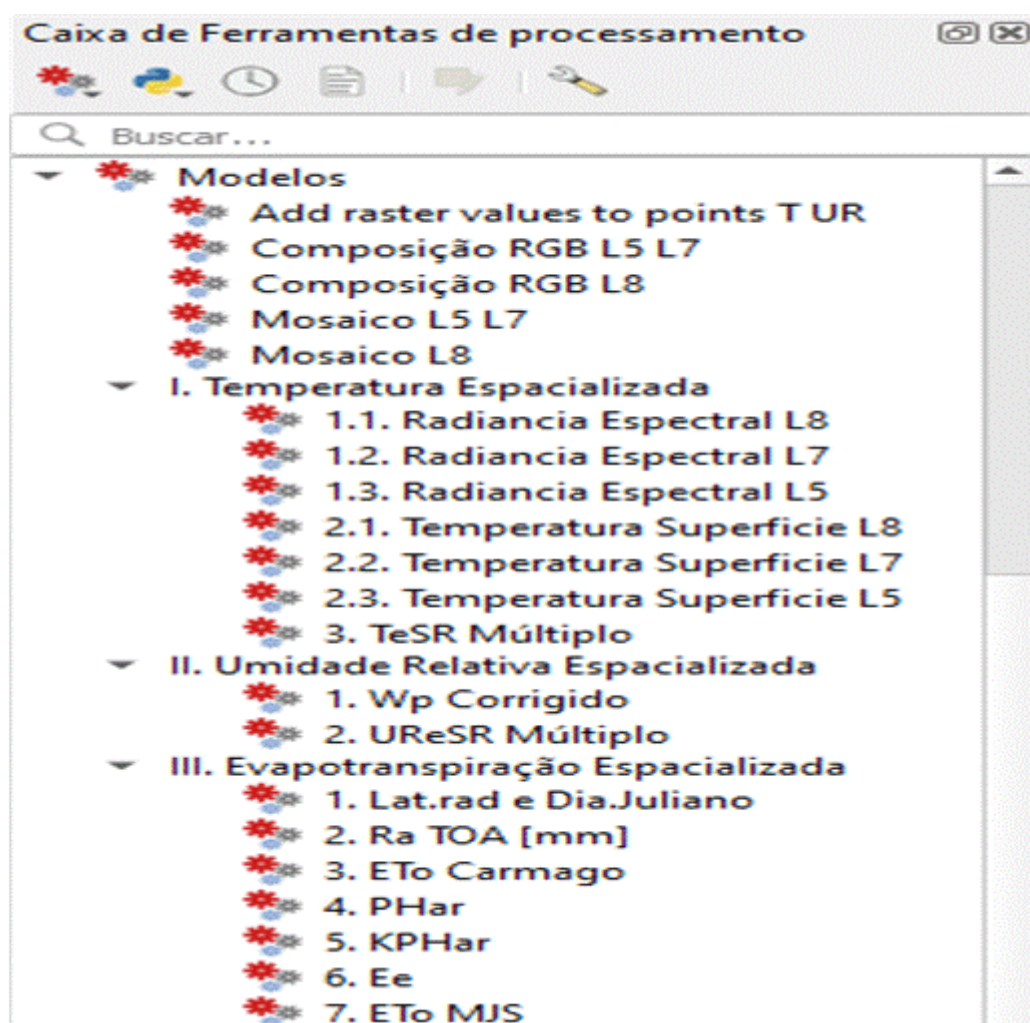
Estação	Passagem MODIS horário	Cena Landsat	Dia Juliano dia	Passagem Landsat data	T_{eSR} (Wp, Ts) °C	UR_{eSR} (wp, Ts) %	ET_{o_c}	$ET_{o_{TW.dc}}$	$ET_{o_{MJS}}$ ($\Psi_{ar}; Ra$)
							----- $mm\ dia^{-1}$ -----		
PGA-SIM	17:05:00	221077	43	12/02/2016	21,26	72,69	3,50	3,31	3,33
			107	16/04/2016	22,29	70,06	2,63	3,16	2,54
			251	07/09/2016	14,30	71,03	1,83	1,53	2,65
			13	13/01/2017	23,68	64,38	4,13	4,14	4,39
			205	24/07/2017	16,69	70,78	1,59	1,82	1,97
			253	10/09/2017	21,36	64,14	2,77	3,04	3,25
			112	22/04/2018	22,70	70,38	2,59	3,23	2,43
			224	12/08/2018	15,24	72,35	1,63	1,61	2,12
TBA-SIM	17:05:00	221077	320	16/11/2018	25,53	59,94	4,36	4,65	4,80
			43	12/02/2016	25,26	70,22	4,16	4,40	3,58
			107	16/04/2016	24,91	70,08	2,97	3,79	2,58
			251	07/09/2016	15,45	68,84	2,00	1,62	2,83
			13	13/01/2017	21,70	61,00	3,78	3,46	4,73
			205	24/07/2017	17,57	70,69	1,70	1,89	2,01
			253	10/09/2017	21,81	64,13	2,85	3,07	3,28
			112	22/04/2018	22,57	69,78	2,60	3,13	2,50
			224	12/08/2018	15,98	71,17	1,73	1,63	2,22
			320	16/11/2018	25,21	60,26	4,30	4,51	4,75

Sendo: FPO-IPR – Fernandes Pinheiro (IAPAR); LDA-IPR – Londrina (IAPAR); CAS-IMT – Castro (INMET); NFT-IMT – Nova Fátima (INMET); VTN-IMT – Ventania (INMET); FPO-SIM – Fernandes Pinheiro (SIMEPAR); PGA-SIM – Ponta Grossa (SIMEPAR); TBA-SIM – Telêmaco Borba (SIMEPAR); $T_{eSR}(Wp, Ts)$ – temperatura do ar estimada com sensoriamento remoto por ajuste linear múltiplo (°C); $UR_{eSR}(wp, Ts)$ – umidade relativa do ar estimada com sensoriamento remoto com ajuste linear múltiplo (%); ET_{o_c} – evapotranspiração de referência estimada com o modelo de Camargo (1971) ($mm\ dia^{-1}$); $ET_{o_{TW.mc}}$ – evapotranspiração de referência corrigida para um m -ésimo mês de ND dias e N horas de fotoperíodo, estimada com o modelo de Thornthwaite ($mm\ mês^{-1}$); ND número de dias do m -ésimo mês (dias); $ET_{o_{MJS}}(\Psi_{ar}; Ra)$ – evapotranspiração de referência estimada com o modelo Moretti-Jerszurki-Silva ($mm\ dia^{-1}$).

APÊNDICE 3 – MÓDULOS PROCESSAMENTO NO SOFTWARE QGIS, PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE ESTIMATIVA DE ET_0 ESPACIALIZADA

O “Modulo Processamento” é uma interface disponibilizada pelo Qgis, que permite ao usuário criar modelos para integrar vários algoritmos disponibilizados no *software*, automatizando entradas e saídas de dados. Os modelos tornam os procedimentos rotineiros mais práticos e ágeis de serem executados. Além disso, é possível executar o modelo criado “em lote”, que permite processar diversos arquivos de uma só vez (Santos, 2021). Na FIGURA A3.1 encontram-se todos os módulos de processamentos criados para auxiliar na execução da metodologia proposta no presente trabalho para estimar a evapotranspiração de referencia espacializada.

FIGURA A3.1 – MODELOS CRIADOS NO MODULO PROCESSAMENTO DO QGIS 3.10.



Os modelos criados podem ser executados em qualquer computador que tenha a versão do Qgis 3.10 ou superior, bastando ter o arquivo do modelo, cuja extensão é “.model3” alocada no diretório:

“C:\Users\AppData\Roaming\QGIS\QGIS3\profiles\default\processing\models”.

A seguir encontra-se detalhada a estrutura, entradas, saídas, algoritmos e configuração de cada modelo desenvolvido, bem como em que etapa da metodologia foi usado.

1 Estimativa da Temperatura da superfície (T_s)

Após a obtenção das imagens da banda 10 do Landsat foi feita a conversão das imagens brutas (pixels com valores de números digitais) para imagens com valores de radiância espectral. Os modelos de “Radiância Espectral” (FIGURA A3.2) baseiam-se na Equação 5 do Capítulo 2, e foram feitas três versões (Landsat 8 - L8; Landsat 7 - L7 e Landsat 5 - L5) do modelo, pois cada satélite possui fatores de redimensionamento multiplicativo (M_L) e aditivo (A_L) diferentes.

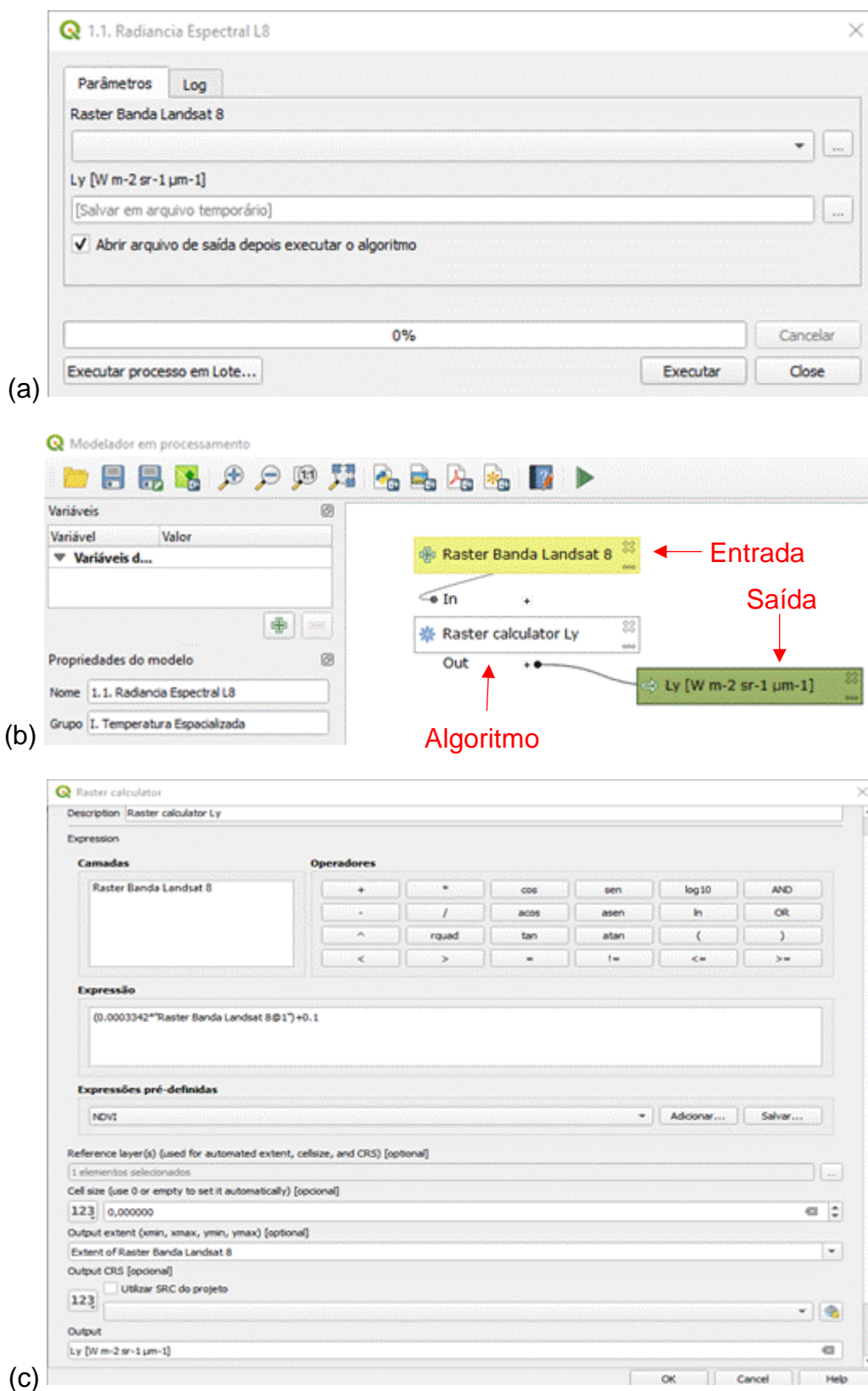
A única diferença entre os modelos de “Radiância Espectral” L8, L7 e L5 está na configuração dos parâmetros (M_L , A_L), que são: *i*) Landsat 8: $M_L = 0,0003342$ e $A_L = 0,1$; *ii*) Landsat 7: $M_L = 0,067087$ e $A_L = -0,06709$; *iii*) Landsat 5: $M_L = 0,055375$ e $A_L = 1,18243$. Os valores foram obtidos nos metadados das imagens. Esses parâmetros são alterados na linha de “Expressão” (FIGURA A3.2c), conforme o satélite escolhido.

Os pixels calibrados para radiância espectral da banda 10 foram convertidos em temperatura da superfície. Os modelos de “Temperatura de Superfície” (FIGURA A3.3) basearam-se na Equação 6 do Capítulo 2, e também foram feitas três versões (L8 L7 e L5) do modelo, porque cada satélite possui diferentes constantes de conversão térmica (K_1 e K_2).

Os modelos de “Temperatura de Superfície” L8, L7 e L5 apresentaram diferentes valores de K_1 e K_2 , que são: *i*) Landsat 8: $K_1 = 774,8853$ e $K_2 = 1321,0789$; *ii*) Landsat 7: $K_1 = 666,09$ e $K_2 = 1282,71$; *iii*) Landsat 5: $K_1 = 607,76$ e $K_2 = 1260,56$. Os valores foram obtidos nos metadados das imagens. Os valores de K_1 e K_2 são alterados na linha de “Expressão” (FIGURA A3.3c), conforme o satélite escolhido.

O modelo “Add raster values to points T UR” foi utilizado para adicionar o valor das imagens de T_s e Wp para o ponto de estação meteorológicas de mesma data. Na FIGURA A3.4 encontra-se a interface do modelo.

FIGURA A3.2 – FORMULÁRIOS E MÓDULOS DO MODELO “Radiância Espectral”, SENDO: a) INTERFACE DO USUÁRIO; b) ESQUEMA DE ENTRADAS, ALGORITMOS E SAÍDAS; c) PARÂMETROS DO ALGORITMO “Raster Calculator”.



FONTE: O autor (2022)

FIGURA A3.3 – FORMULÁRIOS E MÓDULOS DO MODELO “Temperatura de Superfície”, SENDO:
 a) INTERFACE DO USUÁRIO; b) ESQUEMA DE ENTRADAS, ALGORITMOS E SAÍDAS; c)
 PARÂMETROS DO ALGORITMO “Raster Calculator”.

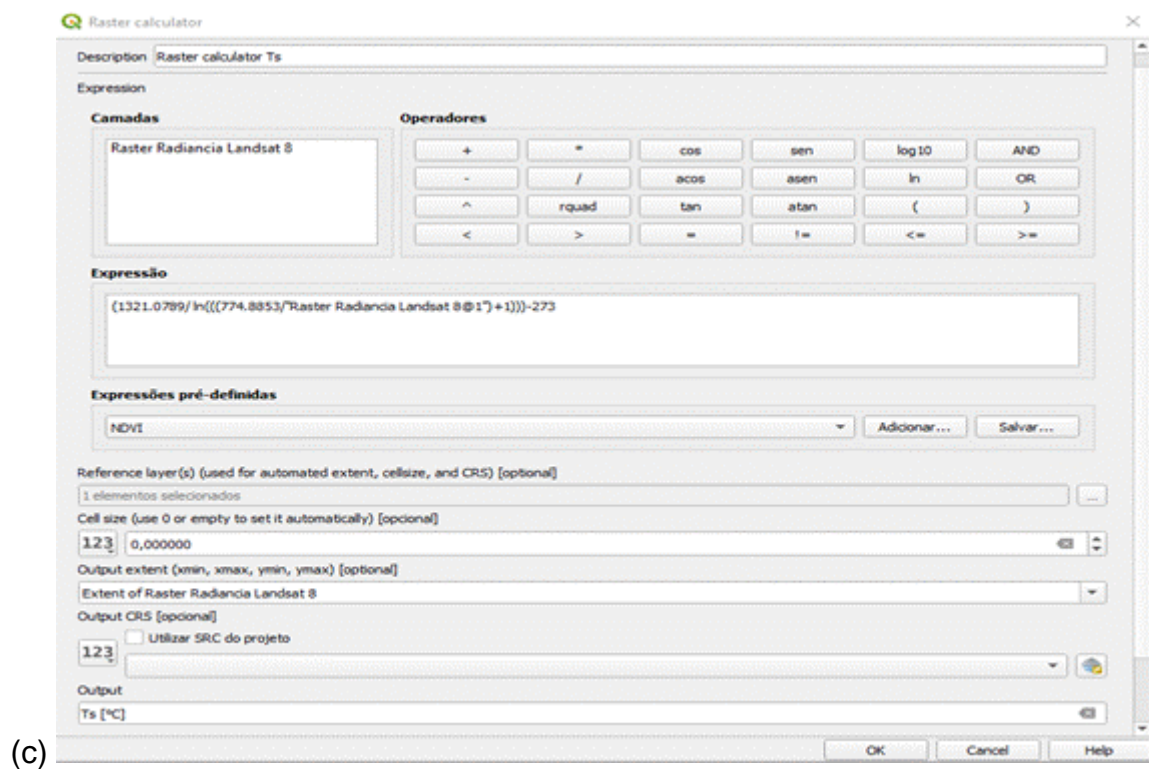
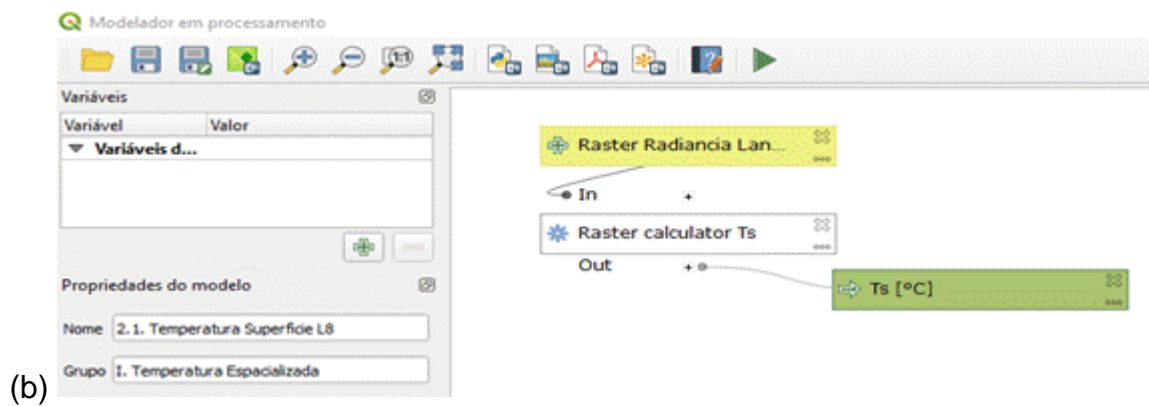
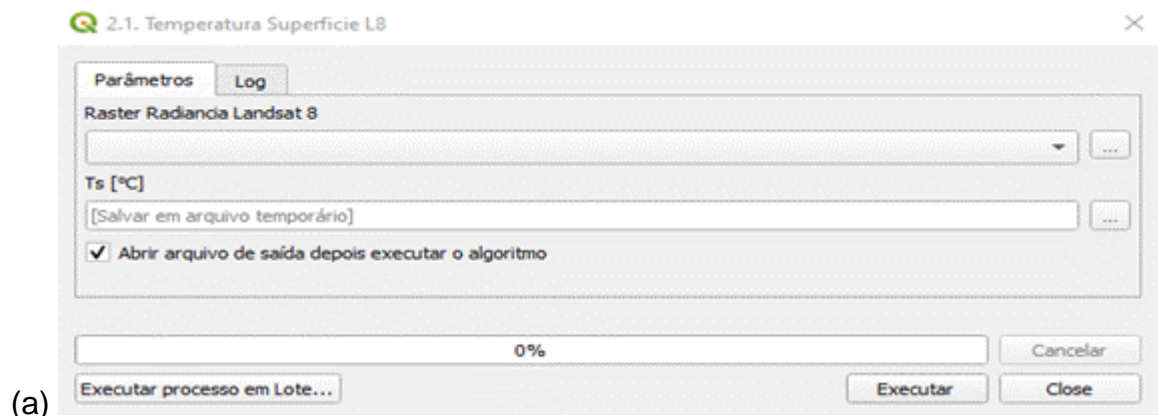
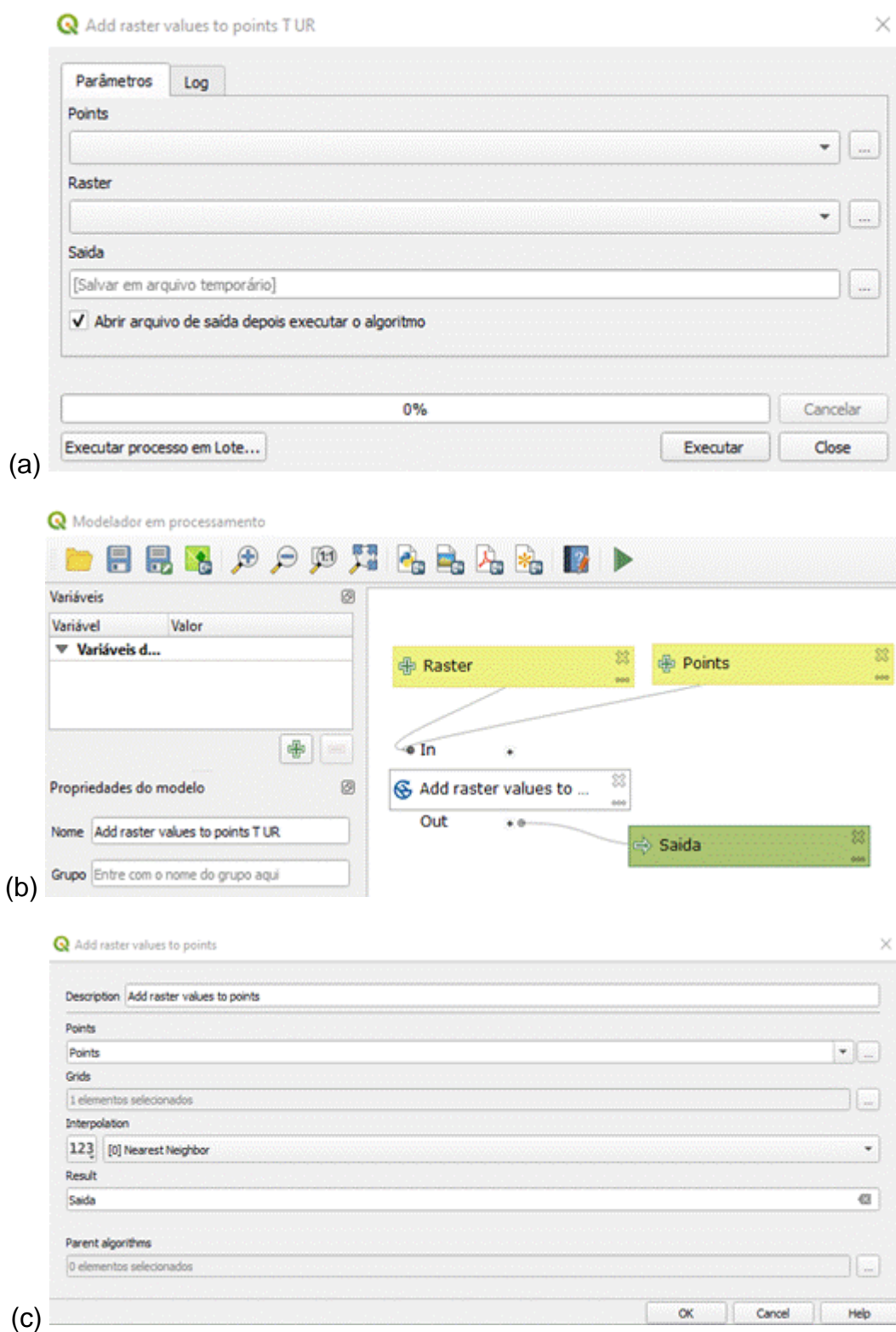


FIGURA A3.4 – FORMULÁRIOS E MÓDULOS DO MODELO “Add raster values to points T UR”, SENDO: a) INTERFACE DO USUÁRIO; b) ESQUEMA DE ENTRADAS, SENDO “Raster” UMA CAMADA IMAGEM E “Points” UMA CAMADA VETORIAL, ALGORITMOS E SAÍDAS; c) PARÂMETROS DO ALGORITMO “Add raster values to points”.

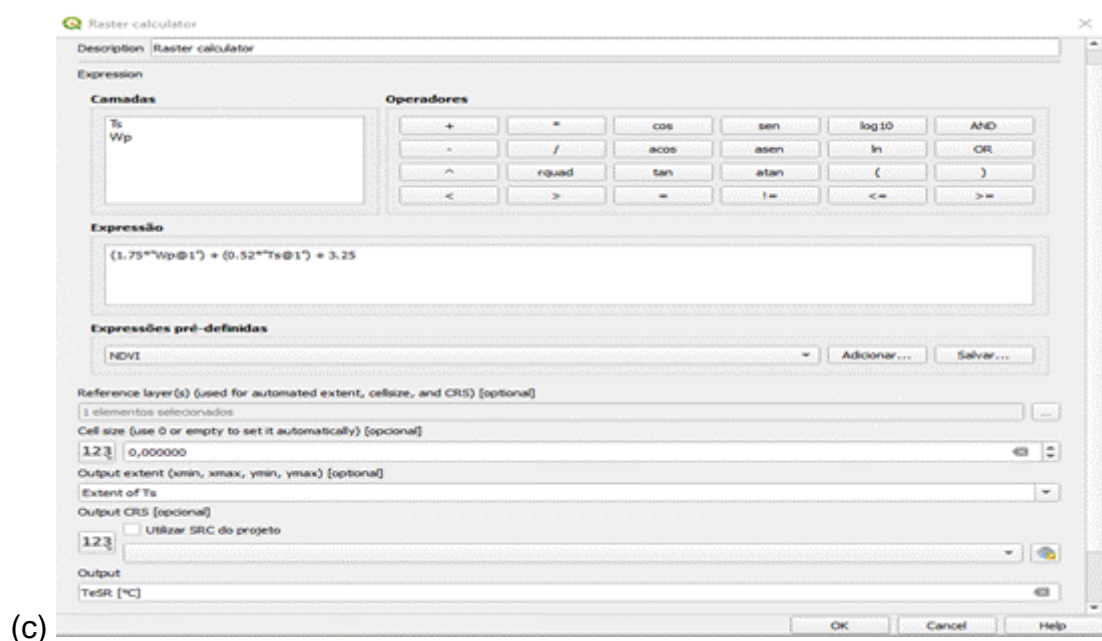
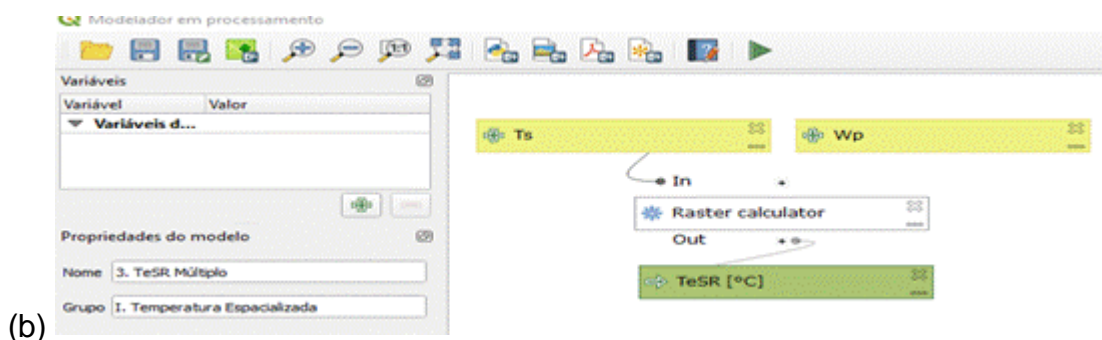
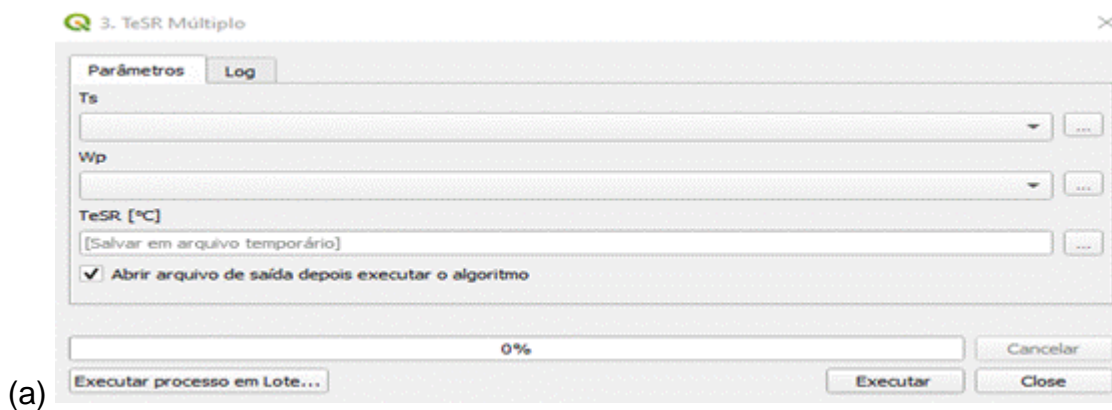


FONTE: O autor (2022)

2 Estimativa da temperatura do ar especializada ($T_{eSR(Wp; Ts)}$)

A $T_{eSR(Wp; Ts)}$ foi estimada com o auxílio do modelo “TeSR Múltiplo” (FIGURA A3.5), utilizando-se os coeficientes calibrados dispostos da Tabela 2.2 do Capítulo 2, conforme a equação: $T_{eSR(Wp; Ts)} = 1,75 \cdot Wp + 0,52 \cdot Ts + 3,25$

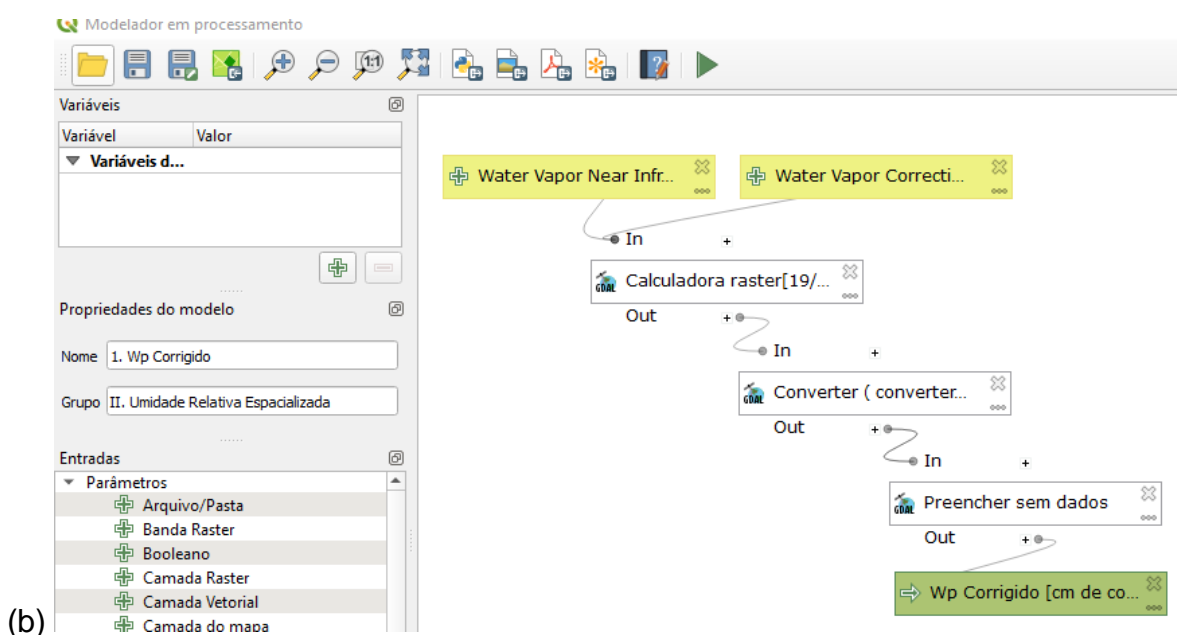
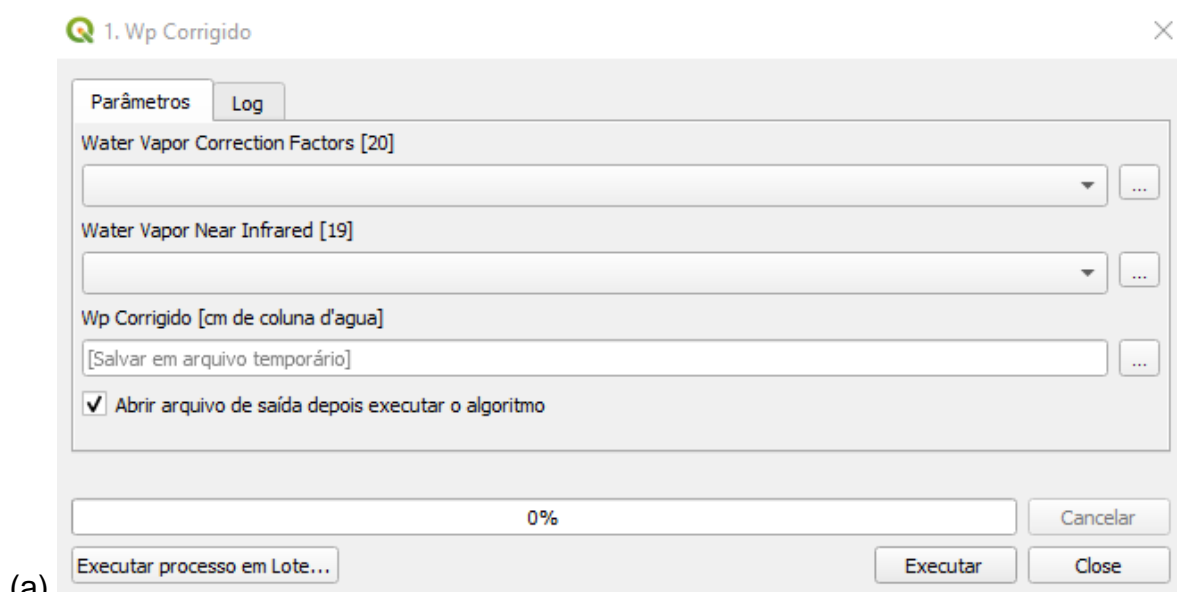
FIGURA A3.5 – FORMULÁRIOS E MÓDULOS DO MODELO “TeSR Múltiplo”, SENDO: a) INTERFACE DO USUÁRIO; b) ESQUEMA DE ENTRADAS, ALGORITMOS E SAÍDAS; c) PARÂMETROS DO ALGORITMO “Raster Calculator”.



3 Estimativa da coluna total de vapor d'água precipitável (W_p)

As imagens de entrada para gerar a W_p foram “Water Vapor Near Infrared” e “Water Vapor Correction Factors”, extraídas do arquivo hdf do sensor modis. No APÊNDICE 1 encontra-se a explicação de como exportar as imagens em formato tiff para serem usadas no modelo (FIGURA A3.6).

FIGURA A3.6 – FORMULÁRIOS E MÓDULOS DO MODELO “ W_p Corrigido”, SENDO: a) INTERFACE DO USUÁRIO; b) ESQUEMA DE ENTRADAS, ALGORITMOS E SAÍDAS; c) PARÂMETROS DO ALGORITMO “Calculadora raster [19/20]”; d) PARÂMETROS DO ALGORITMO “Converter (converter formato)”; e) PARÂMETROS DO ALGORITMO “Preencher sem dados”.



FONTE: O autor (2022)

Continuação: FIGURA A3.6 – FORMULÁRIOS E MÓDULOS DO MODELO “Wp Corrigido”, SENDO:
 a) INTERFACE DO USUÁRIO; b) ESQUEMA DE ENTRADAS, ALGORITMOS E SAÍDAS; c)
 PARÂMETROS DO ALGORITMO “Calculadora raster [19/20]”; d) PARÂMETROS DO ALGORITMO
 “Converter (converter formato)”; e) PARÂMETROS DO ALGORITMO “Preencher sem dados”.

(c)

(d)

(e)

FONTE: O autor (2022)

A utilização do modelo é vantajosa, pois permite que a saída de um algoritmo seja a entrada do próximo, automatizando o modelo. Na FIGURA A3.6c foi necessário dividir a imagem de “Water Vapor Near Infrared” pela “Water Vapor Correction Factors”, para que os valores dos pixels da imagem resultante ficassem em “cm de coluna de água precipitável” (Gao et al., 2015).

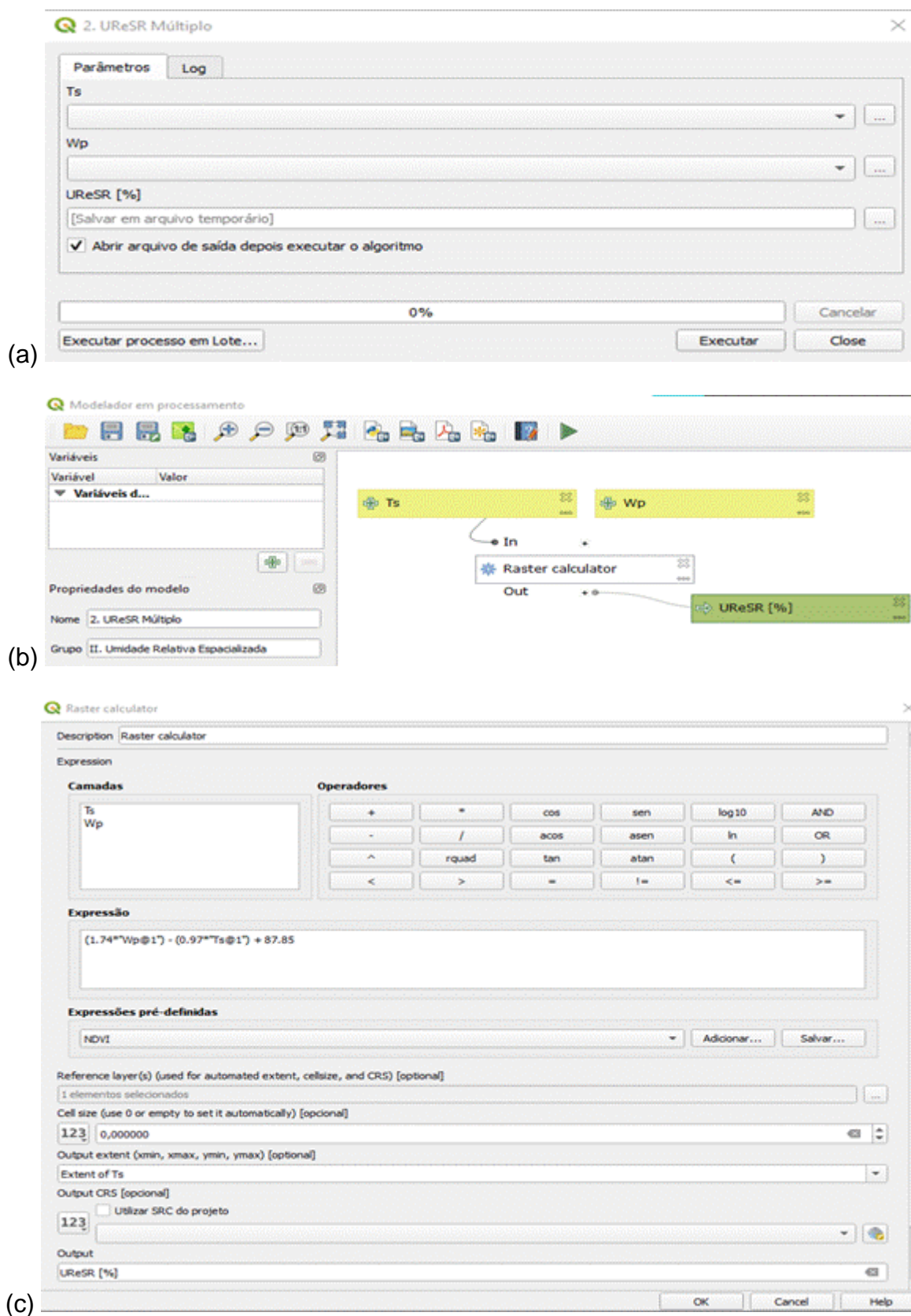
Depois da divisão das imagens alguns pixels ficaram com valores “-9,999”. Para eliminá-los utilizou-se o algoritmo “Converter (converter formato)” (FIGURA A3.6d), para substituir os valores “-9,999” por valores “sem dados”. Somente quando há essa substituição é possível preencher os pixels “sem dados” por valores interpolados com os pixels vizinhos (FIGURA A3.6e). E dessa forma, tem-se a saída final da imagem Wp .

4 Estimativa da umidade relativa do ar espacializada ($UR_{eSR(Wp;Ts)}$)

A $UR_{eSR(Wp;Ts)}$ foi estimada com o auxílio do modelo “UReSR Múltiplo” (FIGURA A3.7), utilizando-se os coeficientes calibrados dispostos da Tabela 2.2 do Capítulo 2, conforme a equação:

$$UR_{eSR(Wp;Ts)} = a_2 \cdot Wp + a_1 \cdot Ts + a_0$$

FIGURA A3.7 – FORMULÁRIOS E MÓDULOS DO MODELO “UReSR Múltiplo”, SENDO: a) INTERFACE DO USUÁRIO; b) ESQUEMA DE ENTRADAS, ALGORITMOS E SAÍDAS; c) PARÂMETROS DO ALGORITMO “Raster Calculator”.



5 Estimativa da radiação solar no topo da atmosfera (R_a)

O modelo “Lat.rad e Dia.Juliano” (FIGURA A3.8) foi utilizado para transformar a imagem bruta da banda 10 do Landsat em dois produtos: *i*) Imagem com valores de Latitude em radianos (em cada pixel); *ii*) Imagem com o valor do dia juliano da data de imageamento. No nome do arquivo da imagem de entrada tem a informação do dia juliano, para que o usuário substitua o número “1” pelo “número do dia juliano” respectivo, na linha “Expressão Dia Juliano” (FIGURA A3.8a).

Utilizou-se o algoritmo “r.mask.rast - Latitude”. No parâmetro “Criar mascara inversa” é importante marcar “sim” (FIGURA A3.8c), para evitar que a borda “no data” da imagem de satélite prejudique o mosaico final das imagens para bacia hidrográfica.

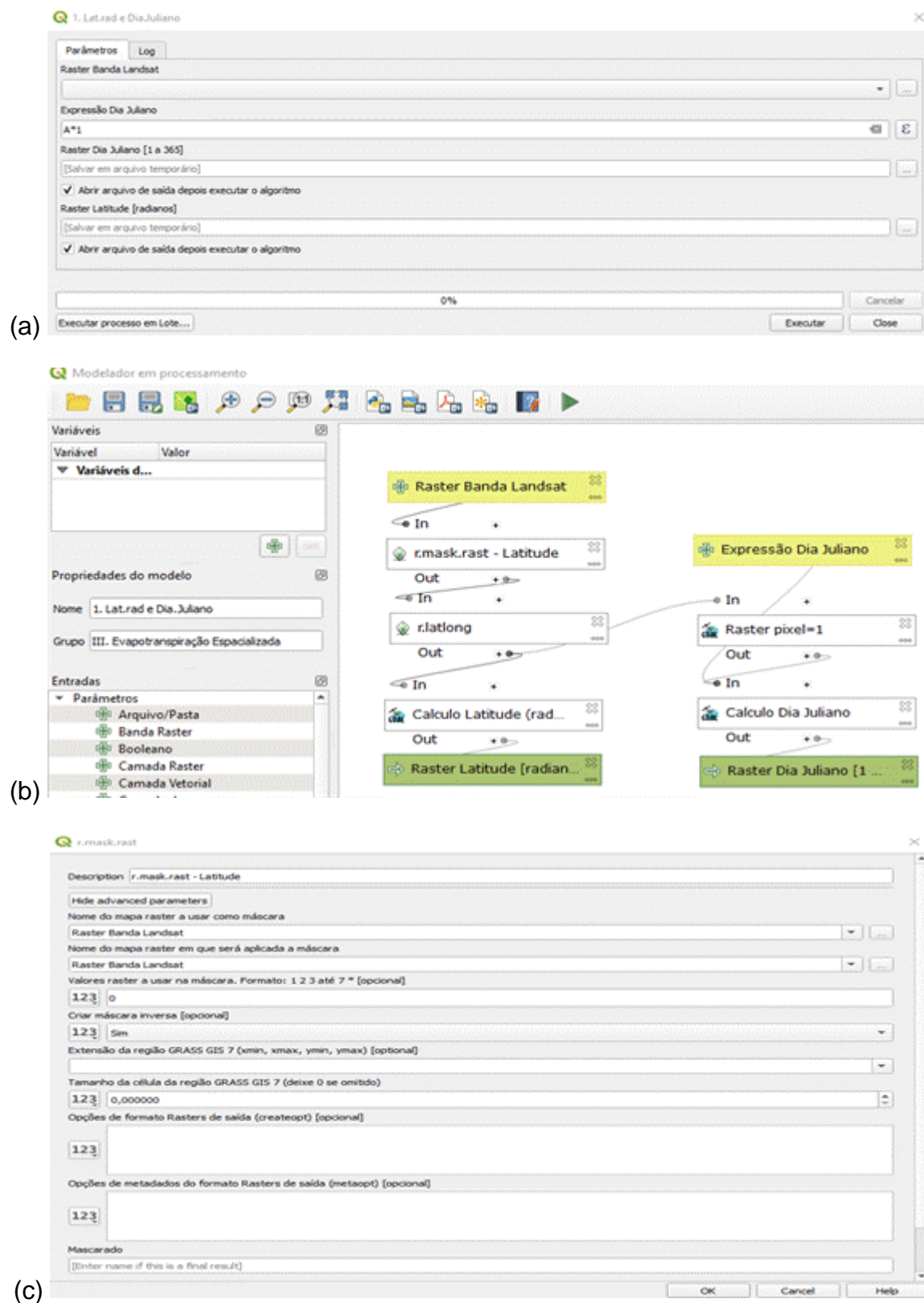
Com a mascara criada, foram calculados valores de latitude (em graus) para cada pixel da imagem (FIGURA A3.8d), somente na área de interesse da imagem Landsat. Com a calculadora raster os valores de latitude foram convertidos de graus para radianos com a equação abaixo (FIGURA A3.8e), obtendo a imagem final de latitude em radianos:

$$Latitude (rad) = \frac{A \cdot 3,14159265}{180}$$

Sendo: A – resultado do algoritmo “r.mask.rast - Latitude” (graus).

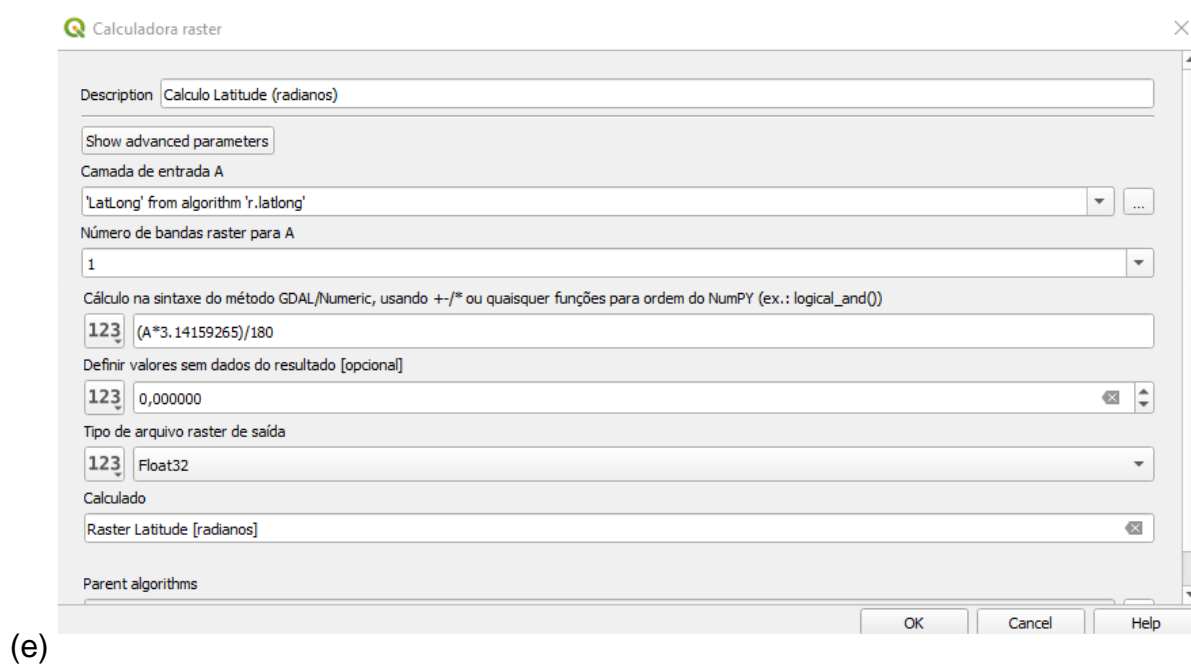
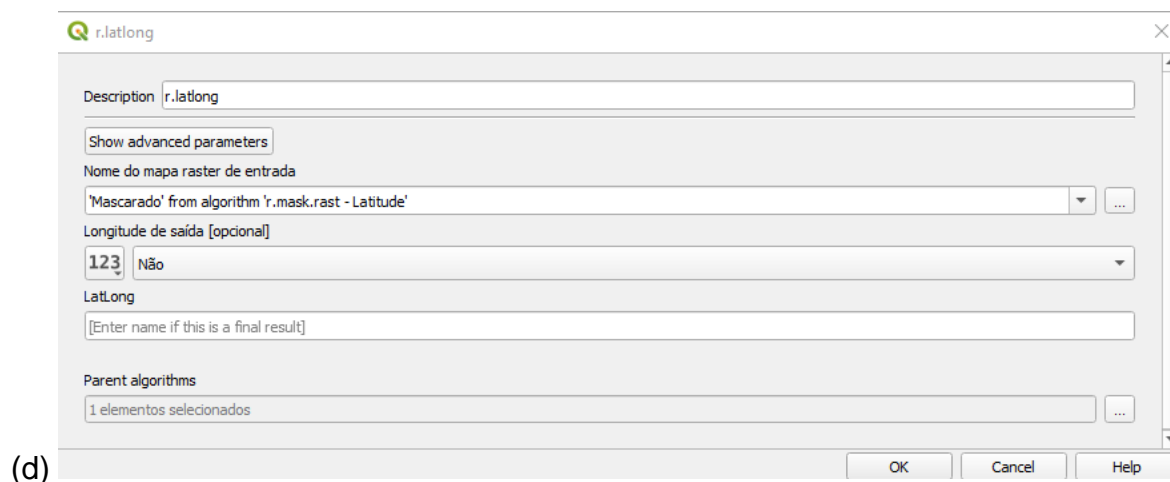
Para a criação de uma imagem com valor único do dia juliano foi utilizada a imagem de latitude, delimitada pela máscara de interesse, para criar uma imagem com valor unitário (igual a 1) em cada pixel (FIGURA A3.8f). Assim, a imagem criada pôde ser multiplicada pelo dia juliano de interesse (FIGURA A3.8g), conforme a escolha do usuário na interface do modelo (FIGURA A3.8a), e de acordo com a imagem de entrada.

FIGURA A3.8 – FORMULÁRIOS E MÓDULOS DO MODELO “Lat.rad e Dia.Juliano”, SENDO: a) INTERFACE DO USUÁRIO; b) ESQUEMA DE ENTRADAS, ALGORITMOS E SAÍDAS; c) PARÂMETROS DO ALGORITMO “r.mask.rast - Latitude”;



FONTE: O autor (2022)

Continuação: FIGURA A3.8 – FORMULÁRIOS E MÓDULOS DO MODELO “Lat.rad e Dia.Juliano”, SENDO: a) INTERFACE DO USUÁRIO; b) ESQUEMA DE ENTRADAS, ALGORITMOS E SAÍDAS; c) PARÂMETROS DO ALGORITMO “r.mask.rast - Latitude”; d) PARÂMETROS DO ALGORITMO “r.latlong”; e) PARÂMETROS DO ALGORITMO “Calculo Latitude (radianos)”; f) PARÂMETROS DO ALGORITMO “Raster pixel=1”; g) PARÂMETROS DO ALGORITMO “Calculo Dia Juliano”



FONTE: O autor (2022)

Continuação: FIGURA A3.8 – FORMULÁRIOS E MÓDULOS DO MODELO “Lat.rad e Dia.Juliano”, SENDO: a) INTERFACE DO USUÁRIO; b) ESQUEMA DE ENTRADAS, ALGORITMOS E SAÍDAS; c) PARÂMETROS DO ALGORITMO “r.mask.rast - Latitude”; d) PARÂMETROS DO ALGORITMO “r.latlong”; e) PARÂMETROS DO ALGORITMO “Calculo Latitude (radianos)”; f) PARÂMETROS DO ALGORITMO “Raster pixel=1”; g) PARÂMETROS DO ALGORITMO “Calculo Dia Juliano”

(f)

Calculadora raster

Description: Raster pixel=1

Show advanced parameters

Camada de entrada A: 'Lat.long' from algorithm 'r.latlong'

Número de bandas raster para A: 1

Cálculo na sintaxe do método GDAL/Numeric, usando +/* ou quaisquer funções para ordem do NumPY (ex.: logical_and()): 123 A/A

Definir valores sem dados do resultado [opcional]: 123 0,000000

Tipo de arquivo raster de saída: 123 UInt16

Calculado: [Enter name if this is a final result]

Parent algorithms: 0 elementos selecionados

OK Cancel Help

(g)

Calculadora raster

Description: Calculo Dia Juliano

Show advanced parameters

Camada de entrada A: 'Calculado' from algorithm 'Raster pixel=1'

Número de bandas raster para A: 1

Cálculo na sintaxe do método GDAL/Numeric, usando +/* ou quaisquer funções para ordem do NumPY (ex.: logical_and()): A usar entrada de modelo Expressão Dia Juliano

Definir valores sem dados do resultado [opcional]: 123 0,000000

Tipo de arquivo raster de saída: 123 UInt16

Calculado: Raster Dia Juliano [1 a 365]

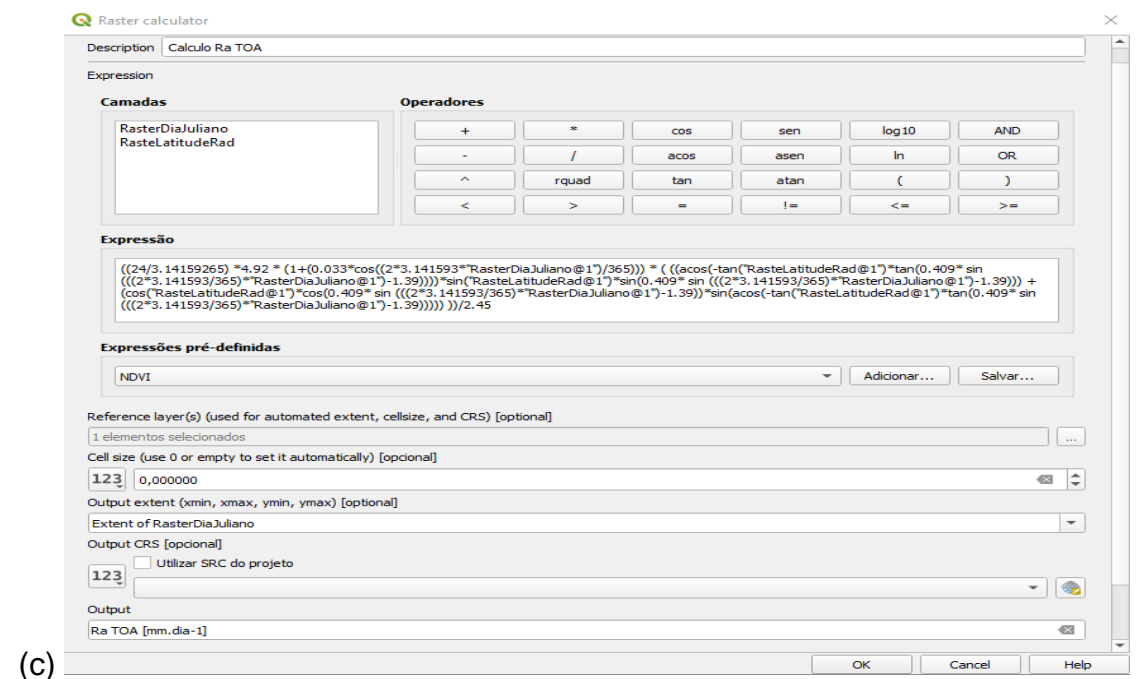
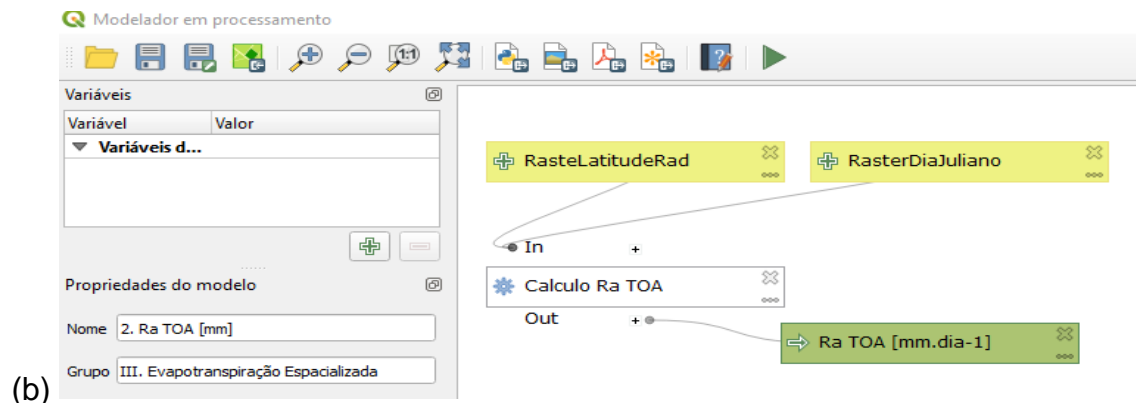
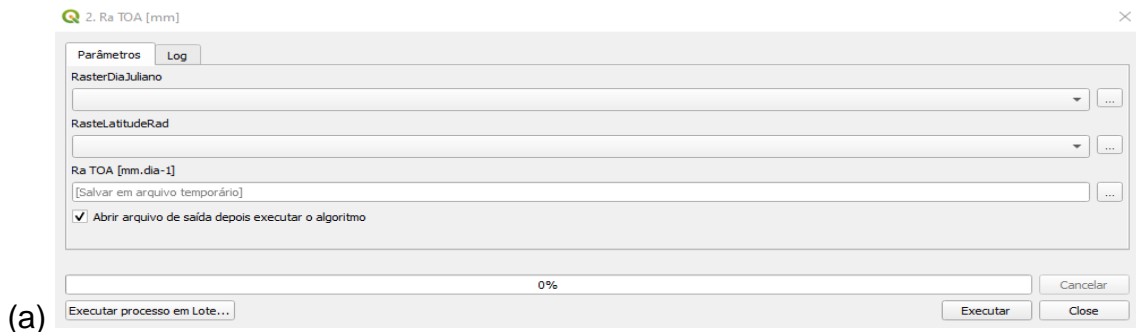
Parent algorithms: 0 elementos selecionados

OK Cancel Help

FONTE: O autor (2022)

As duas imagens (latitude em radianos e dia juliano) serviram de entrada para o cálculo da radiação solar no topo da atmosfera (Ra), com o modelo “Ra TOA [mm]” (FIGURA A3.9).

FIGURA A3.9 – FORMULÁRIOS E MÓDULOS DO MODELO “Ra TOA [mm]”, SENDO: a) INTERFACE DO USUÁRIO; b) ESQUEMA DE ENTRADAS, ALGORITMOS E SAÍDAS; c) PARÂMETROS DO ALGORITMO “Calculo Ra TOA”.



6 Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) com o método de Camargo

O modelo “ETo Camargo” (FIGURA A3.10) necessita de duas entradas: *i*) Imagem da temperatura do ar espacializada, que é o resultado do modelo “TeSR Múltiplo”, detalhado no Item 2 do APÊNDICE 3; e, *ii*) Imagem da radiação solar no topo da atmosfera (Ra), detalhado no Item 2 do APÊNDICE 3. A equação disposta no campo “expressão” da FIGURA A3.10c baseia-se no modelo de Camargo, descrita no Item 2.4.6 do Capítulo 2.

7 Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) com o modelo Moretti-Jerszurki-Silva

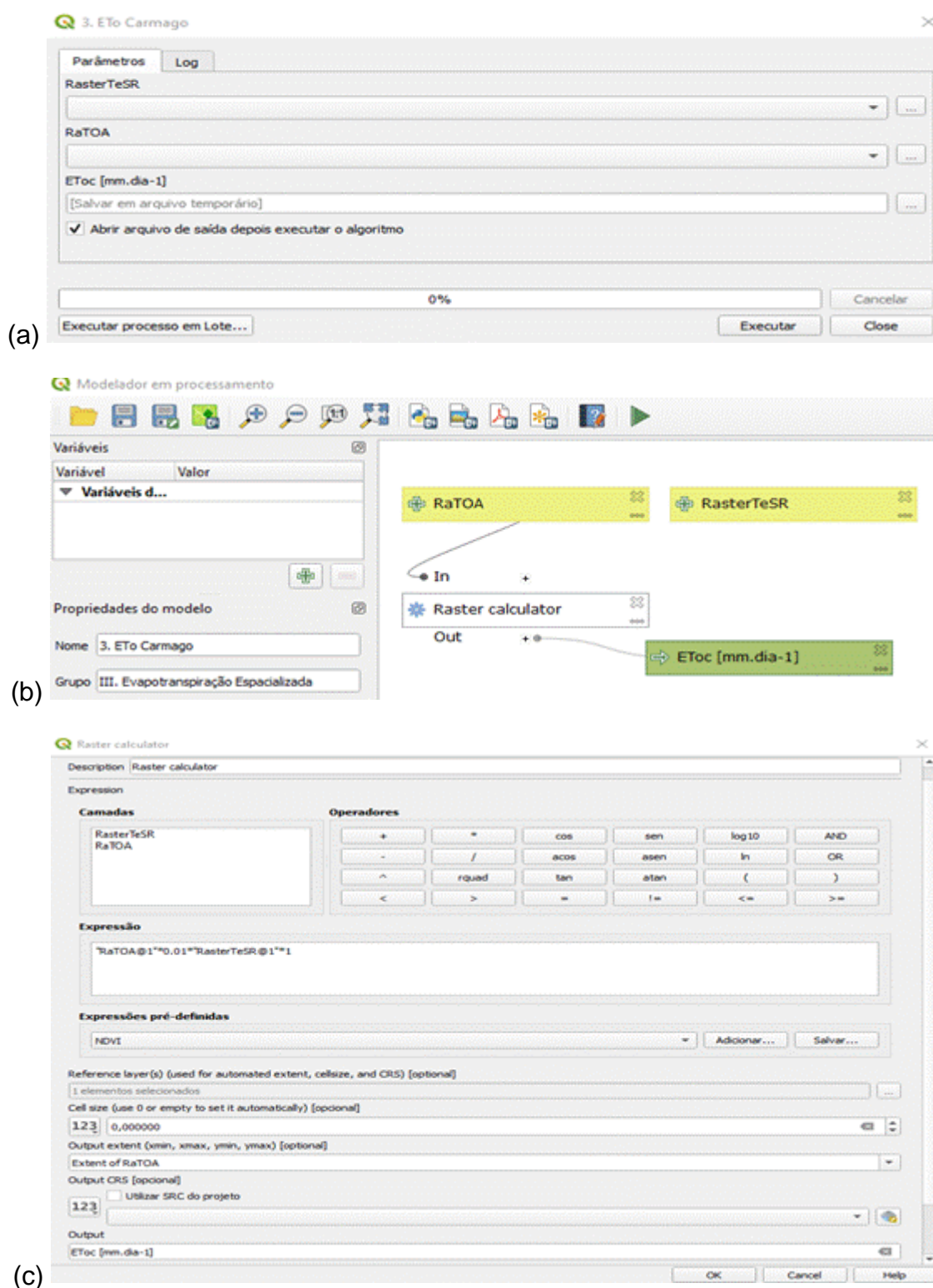
O modelo “PHar” (FIGURA A3.11), que consiste no potencial hídrico atmosférico, é a primeira estimativa para se calcular a $ET_{oMJS}(\psi_{ar}; Ra)$ espacializada (detalhado no Item 2.4.6 do Capítulo 2). O modelo necessita de duas entradas: *i*) Imagem da temperatura do ar espacializada, resultado do modelo “TeSR Múltiplo”, detalhado no Item 2 do APÊNDICE 3; e, *ii*) Imagem da umidade relativa do ar espacializada, resultado do modelo “UReSR Múltiplo”, detalhado no Item 4 do APÊNDICE 3.

O modelo “KPHar” (FIGURA A3.12) refere-se ao coeficiente de proporcionalidade do potencial hídrico atmosférico, necessário como entrada no resultado final do modelo “PHar”.

O modelo “Ee” (FIGURA A3.13) refere-se à evaporação equivalente de água, que necessita de duas entradas: *i*) Imagem final do modelo “KPHar”; e, *ii*) Imagem final do modelo “Ra TOA [mm]”.

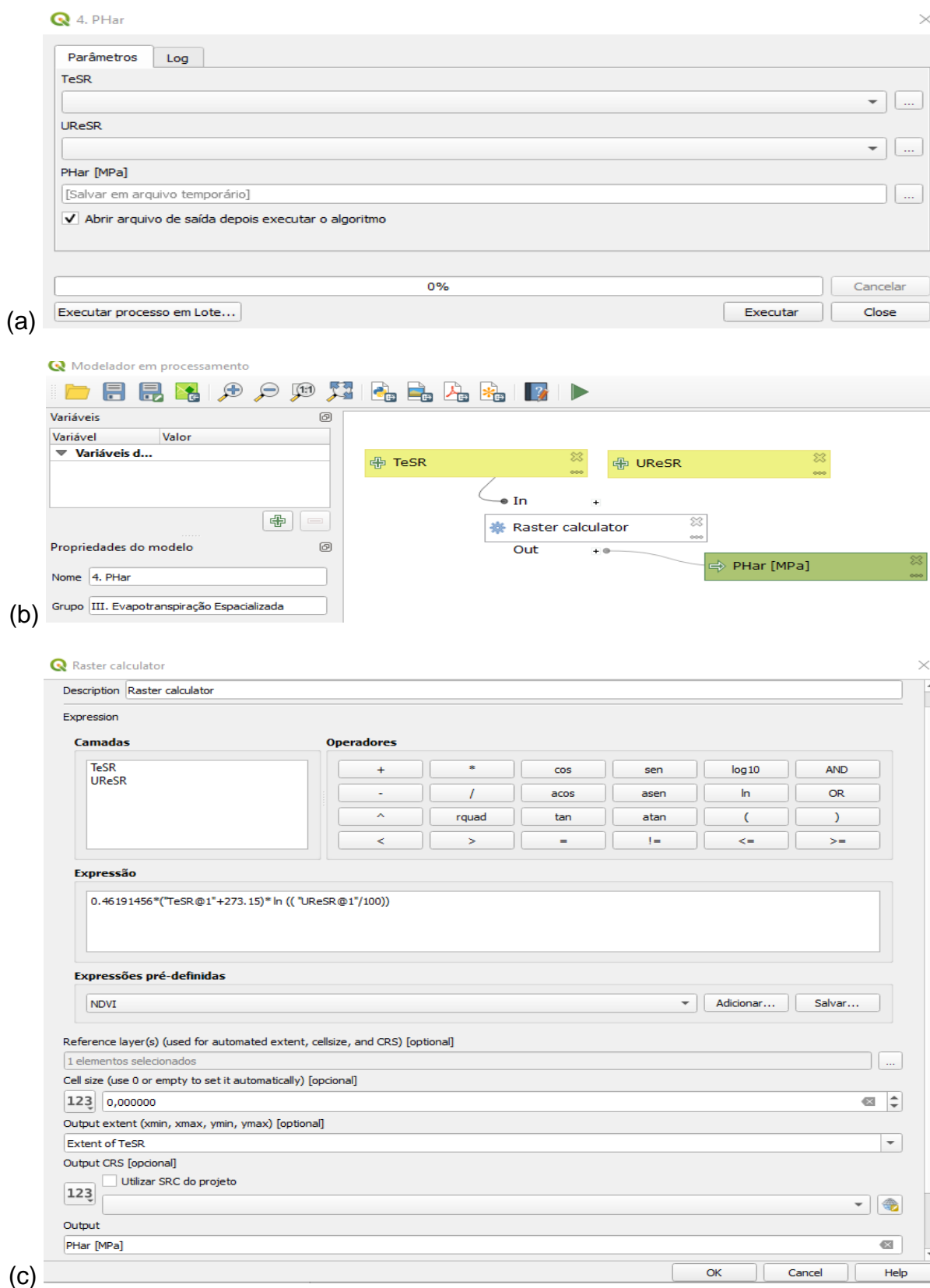
O modelo “ETo MJS” necessita somente da imagem final “Ee” para gerar a imagem de evapotranspiração de referência com o modelo Moretti-Jerszurki-Silva.

FIGURA A3.10 – FORMULÁRIOS E MÓDULOS DO DO MODELO “ETo Camargo”, SENDO: a) INTERFACE DO USUÁRIO; b) ESQUEMA DE ENTRADAS, ALGORITMOS E SAÍDAS; c) PARÂMETROS DO ALGORITMO “Raster Calculator”.



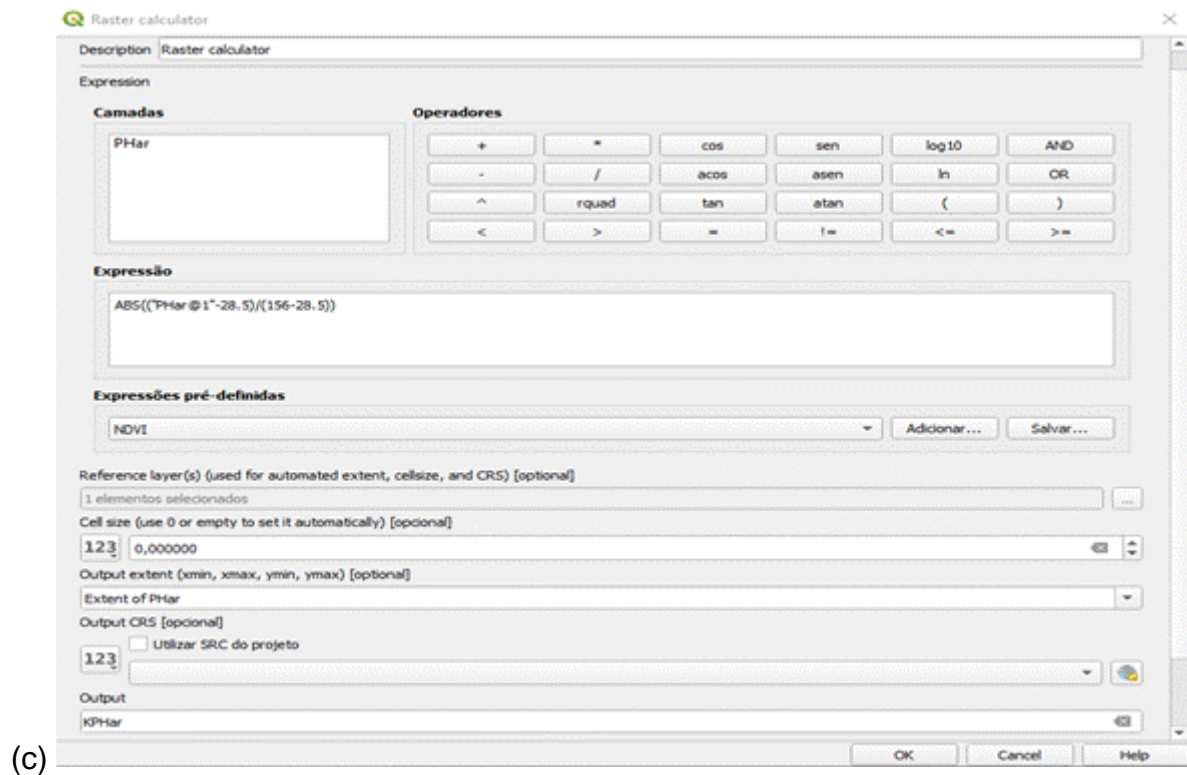
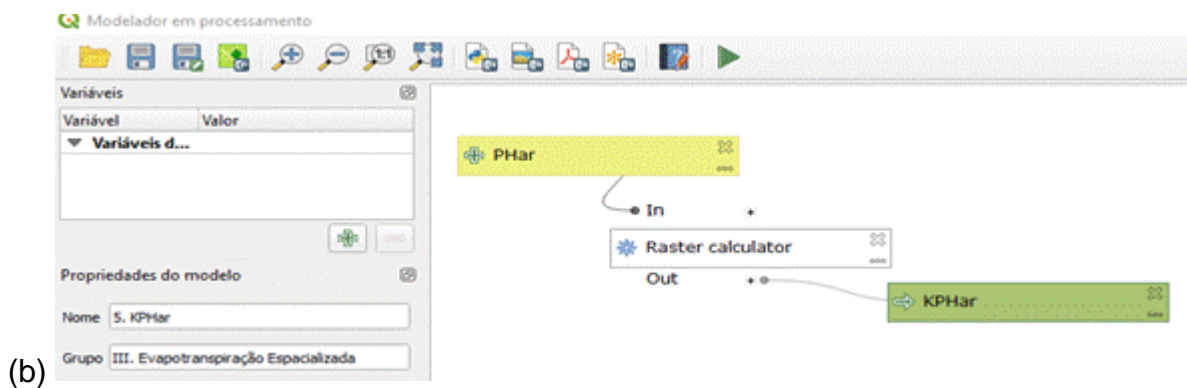
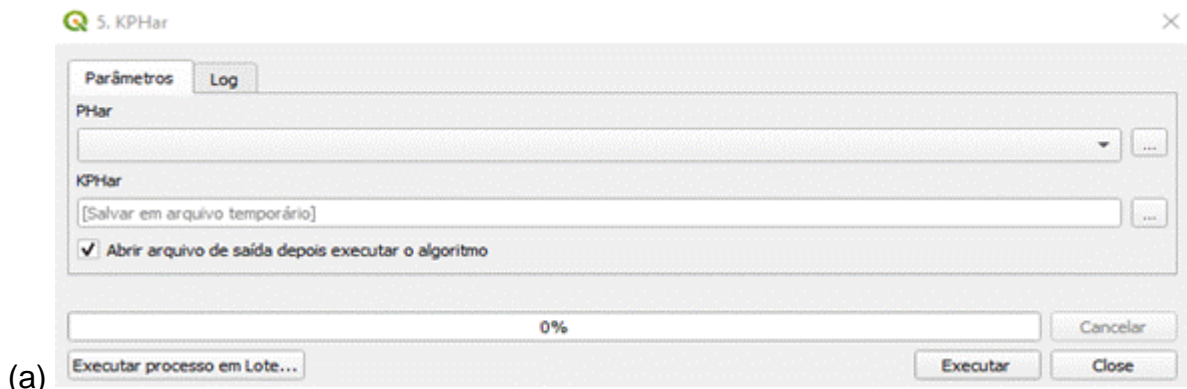
FONTE: O autor (2022)

FIGURA A3.11 – FORMULÁRIOS E MÓDULOS DO MODELO “P_{Har}”, SENDO: a) INTERFACE DO USUÁRIO; b) ESQUEMA DE ENTRADAS, ALGORITMOS E SAÍDAS; c) PARÂMETROS DO ALGORITMO “Raster Calculator”.



FONTE: O autor (2022)

FIGURA A3.12 – FORMULÁRIOS E MÓDULOS DO MODELO “KPHar”, SENDO: a) INTERFACE DO USUÁRIO; b) ESQUEMA DE ENTRADAS, ALGORITMOS E SAÍDAS; c) PARÂMETROS DO ALGORITMO “Raster Calculator”.



FONTE: O autor (2022)

FIGURA A3.13 – FORMULÁRIOS E MÓDULOS DO MODELO “Ee”, SENDO: a) INTERFACE DO USUÁRIO; b) ESQUEMA DE ENTRADAS, ALGORITMOS E SAÍDAS; c) PARÂMETROS DO ALGORITMO “Raster Calculator”.

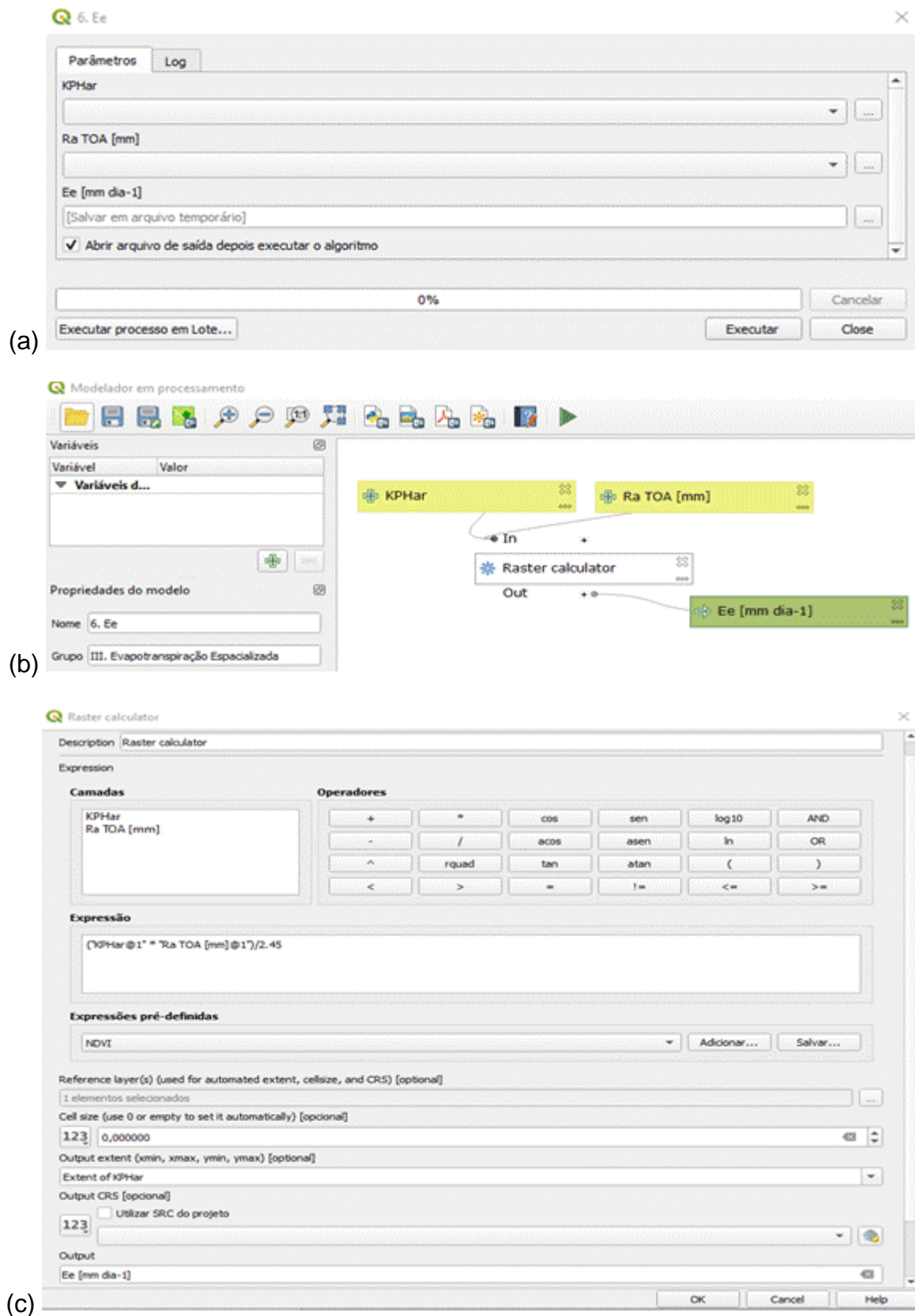
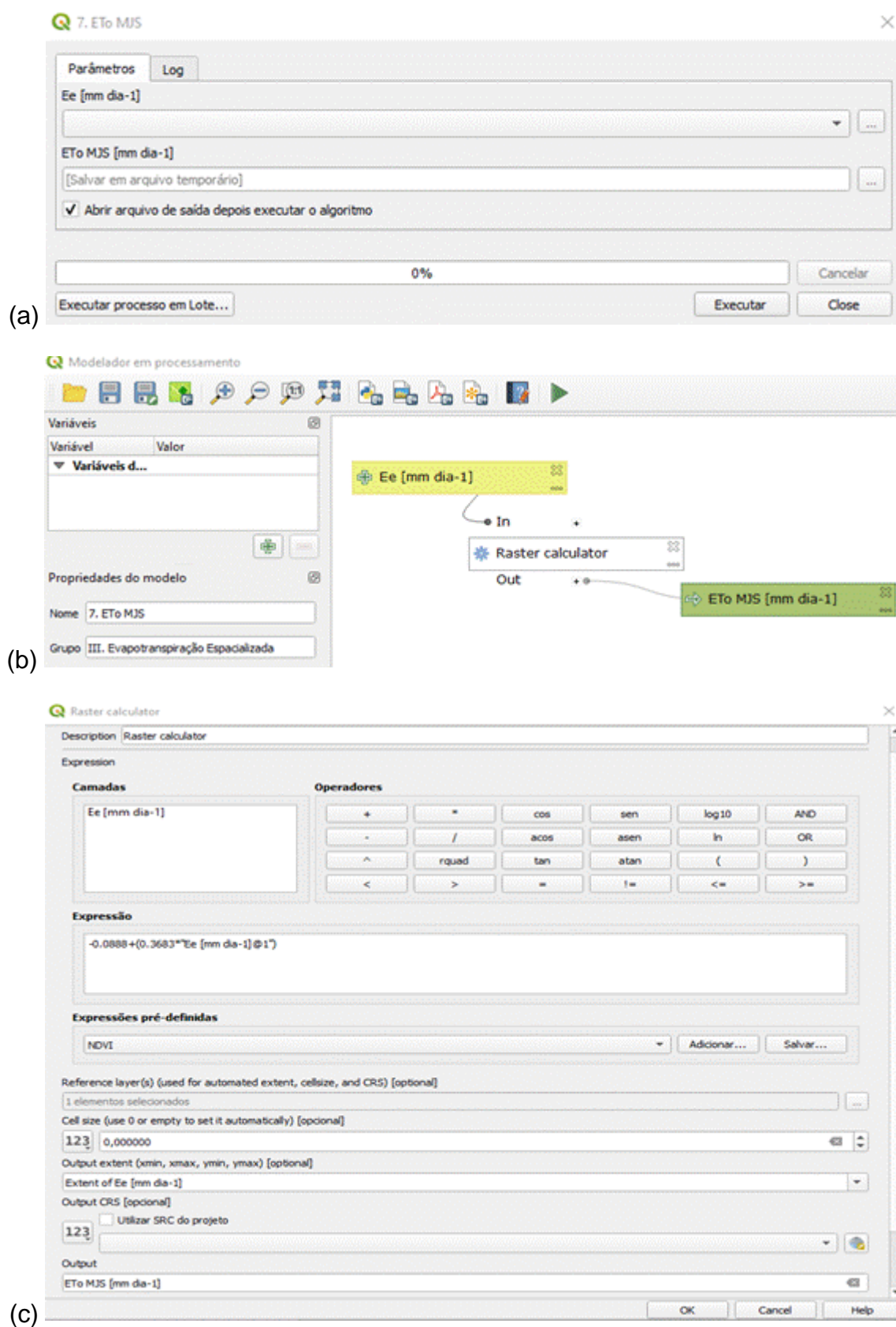


FIGURA A3.14 – FORMULÁRIOS E MÓDULOS DO MODELO “ET_o MJS”, SENDO: a) INTERFACE DO USUÁRIO; b) ESQUEMA DE ENTRADAS, ALGORITMOS E SAÍDAS; c) PARÂMETROS DO ALGORITMO “Raster Calculator”.



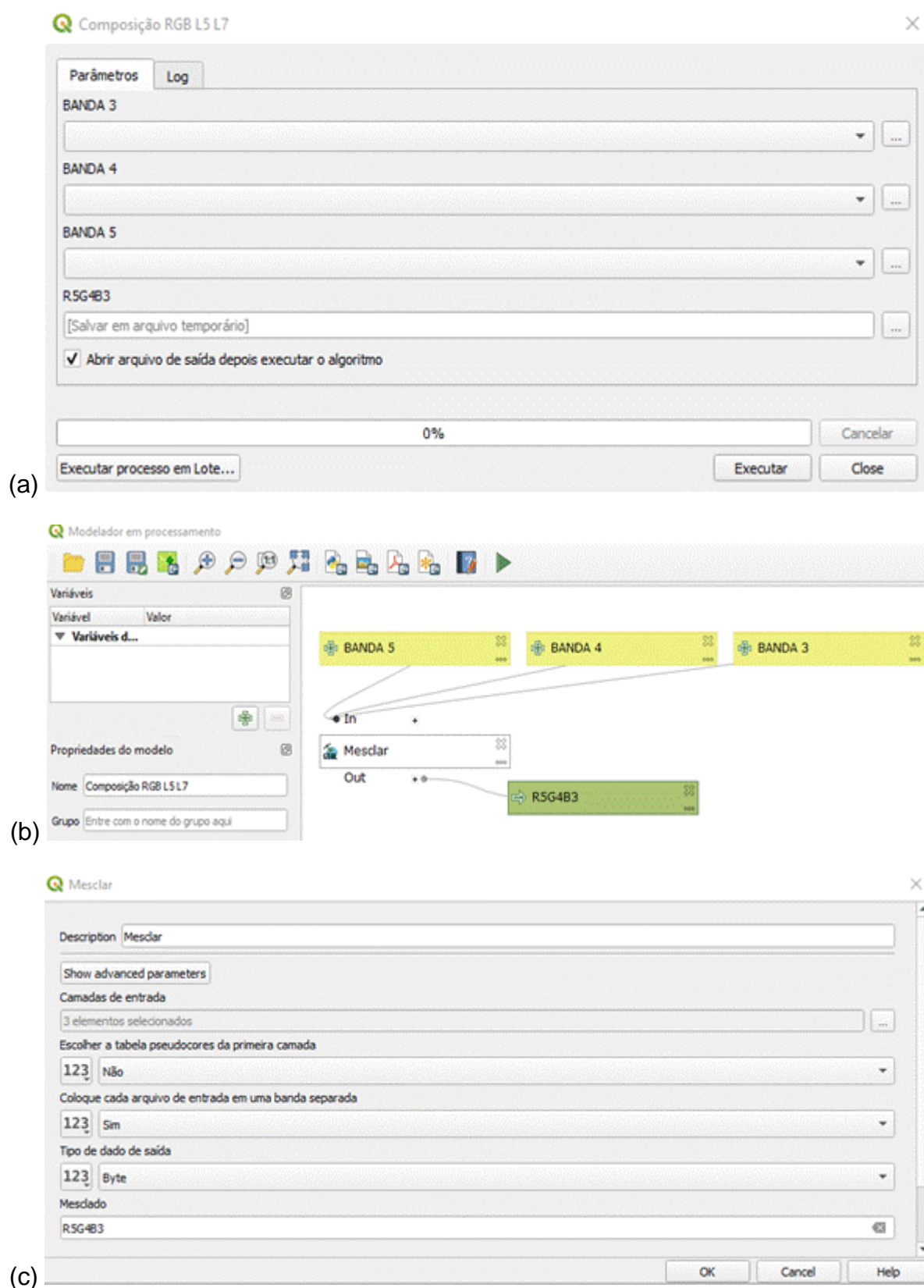
8 Modelos para processamentos rotineiros

O modelo “Composição RGB L5 L7” (FIGURA A3.15) cria uma imagem colorida para permitir melhor análise do uso do solo da região imageada, pelos Satélites Landsat 5 e 7. O modelo foi utilizado no Capítulo 3 para análise da variabilidade espacial da *ET_o*.

Para composições coloridas do satélite Landsat 8 foi criado o modelo “Composição RGB L8”, com a mesma estrutura do modelo “Composição RGB L5 L7”, porém diferenciando-se em dois aspectos: *i*) As bandas do Landsat 8 são as 6, 5 e 4 (FIGURA A3.15b); *ii*) O “Tipo de dado de saída” é “UInt16” (FIGURA A3.15c).

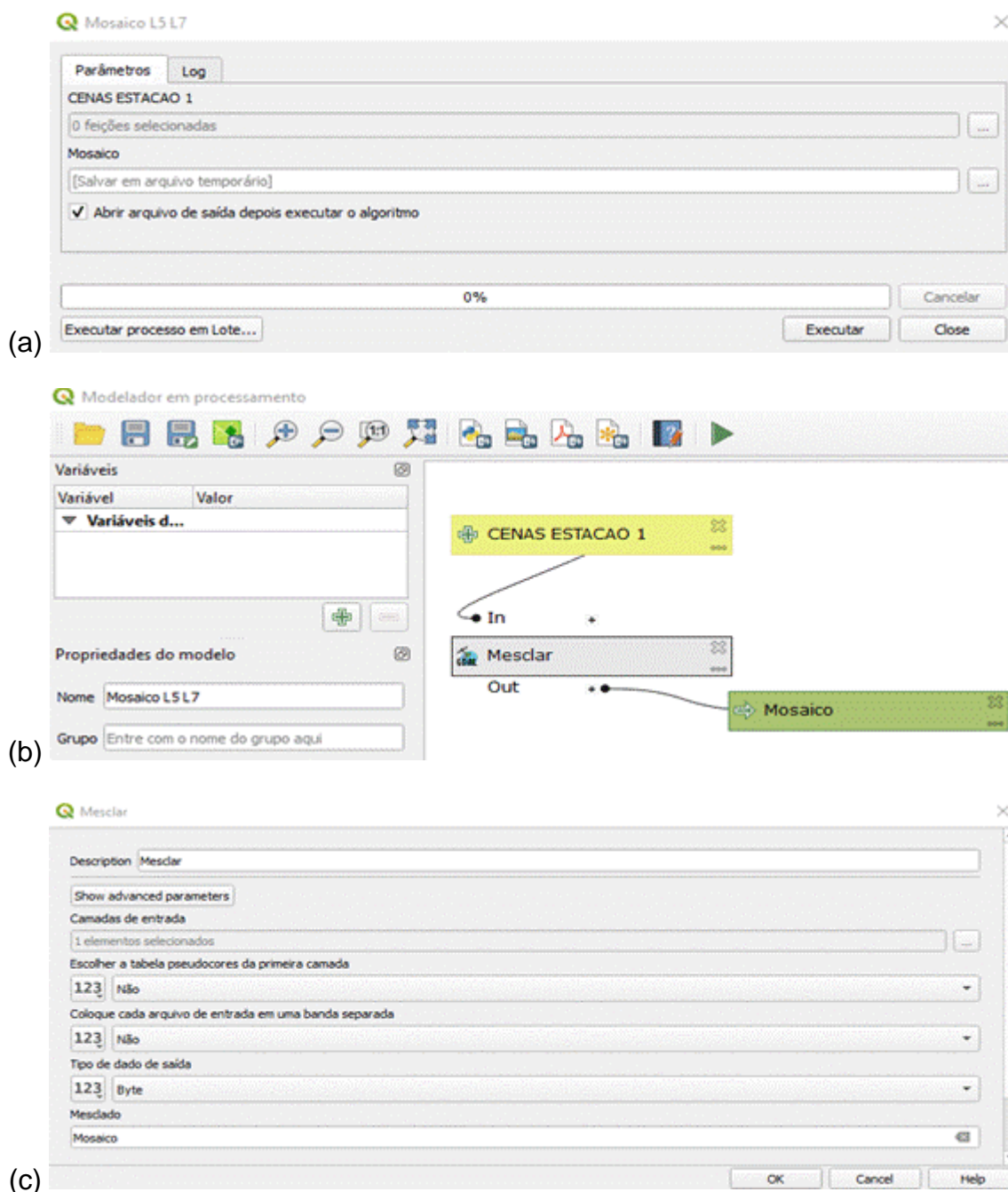
O modelo “Mosaico L5 L7” (FIGURA A3.16) foi criado para unir todas as cenas que compõem a Bacia Hidrográfica do Rio Tibagi. A outra versão do modelo para o Landsat 8 possui a mesma estrutura, porém difere no “Tipo de dado de saída” que é “UInt16” (FIGURA A3.16c).

FIGURA A3.15 – FORMULÁRIOS E MÓDULOS DO MODELO “Composição RGB L5 L7”, SENDO: a) INTERFACE DO USUÁRIO; b) ESQUEMA DE ENTRADAS, ALGORITMOS E SAÍDAS; c) PARÂMETROS DO ALGORITMO “Mesclar”.



FONTE: O autor (2022)

FIGURA A3.16 – FORMULÁRIOS E MÓDULOS DO MODELO “Mosaico L5 L7”, SENDO: a) INTERFACE DO USUÁRIO; b) ESQUEMA DE ENTRADAS, ALGORITMOS E SAÍDAS; c) PARÂMETROS DO ALGORITMO “Mesclar”.



FONTE: O autor (2022)

REFERÊNCIAS

GAO, B., et al., 2015. MODIS Atmosphere L2 Water Vapor Product. NASA MODIS Adaptive Processing System, Goddard Space Flight Center, USA: DOI http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MYD05_L2.006 (Aqua)

SANTOS, J. P. **QGIS 3.10: Modelo para Gerar a Composição RGB e a Fusão de Imagens CBERS-4**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=CAVdH5ziKi8>. Acesso em: 25 março 2021.

APÊNDICE 4 – ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA COM O MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH ASCE ($ET_{o_{PM}}$)

A estimativa da ET_o (mm dia⁻¹) foi realizado com o método Penman-Monteith, parametrizado pela *American Society of Civil Engineers* (ASCE) (ASCE-EWRI, 2005).

$$ET_{o_{PM-ASCE}} = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma_{psy} \cdot \frac{Cn}{(T + 273)} \cdot u_2 \cdot (es - ea)}{\Delta + \gamma_{psy} \cdot (1 + Cd \cdot u_2)}$$

Sendo: $ET_{o_{PM-ASCE}}$ – evapotranspiração de referência calculada com o modelo Penman-Monteith ASCE (mm dia⁻¹); Δ – declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar (kPa °C⁻¹); Rn – saldo de radiação diário (MJ m⁻² dia⁻¹); G – balanço do fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹); γ_{psy} – constante psicrométrica (kPa °C⁻¹); T – temperatura média diária do ar (°C); Cn – constante do numerador relacionada à superfície de referência e intervalo de tempo adotados, sendo considerado igual a 900 para culturas de porte baixo (adimensional); Cd – constante do denominador relacionada à superfície de referência e intervalo de tempo adotados, sendo considerada igual a 0,34 (adimensional) es – pressão de saturação de vapor d'água (kPa); ea – pressão atual de vapor d'água (kPa); u_2 – velocidade média diária do vento a 2 m de altura, sendo necessária a correção quando medida em altura diferente (m s⁻¹).

O cálculo da ET_o foi realizado em uma planilha eletrônica (FIGURA A1.1) que está sendo desenvolvida na Plataforma Moretti (Souza, 2018a). Os procedimentos metodológicos que constituem a planilha para o cálculo da ET_o foram apresentados e descritos a seguir conforme Souza (2018b).

FIGURA A1.1 – PLANILHA ELETRÔNICA QUE ESTÁ SENDO DESENVOLVIDA NA PLATAFORMA MORETTI PARA O CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA COM O MODELO DE PENMAN-MONTEITH, PARAMETRIZADO PELA AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE)

Voltar		Limpar dados		Formulas		CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ($E_{To PM}$) DIÁRIA COM O MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH													
Informações gerais do local analisado:						Opções sobre a radiação solar incidente (R_s) do local:													
Data inicial dos cálculos:						Radiação solar incidente (R_s): Estimada com a equação de Hargreaves e Samani													
Latitude (ϕ):						Coeficiente linear "a" de Angström-Prescott:													
Altitude do local (Z):						Coeficiente angular "b" de Angström-Prescott:													
Altura da medida do vento (z):						Coeficiente K_{ES} de Hargreaves e Samani:													
Unidade de medida da velocidade do vento:						Declaração de constantes:													
						Constante solar (G_{sc}):													
						Albedo da cultura Gramma (α):													
						Constante de Stefan-Boltzmann (σ):													
Dados e intervalos de tempo						Dados de entrada						Atmosfera e psicrometria							
Item	DATA				Hora (UTC)		Temperaturas (°C)		Umidade Relativa (%)		u_z	T_{med}	UR_{med}	$u_z corrigida$	P_{atm}	γ	e_s	e_a	Δ
	Data	Dia	Mês	Ano	Início	Fim	T_{min}	T_{max}	UR_{min}	UR_{max}									
1	06/02/2014	6	2	2014	0	24	21,6	33,8	56,60	56,60	0,52	27,7	56,6	0,4	91,2	0,0606	3,9202	2,1024	0,2168
2	30/06/2014	30	6	2014	0	24	5,2	16,8	65,60	65,60	2,15	11,0	65,6	1,6	91,2	0,0606	1,3989	0,8611	0,0873
3	01/08/2014	1	8	2014	0	24	10,3	26,8	79,70	79,70	1,23	18,6	79,7	0,9	91,2	0,0606	2,3883	1,7028	0,1338
4	25/02/2015	25	2	2015	0	24	14,8	29,5	79,10	79,10	1,04	22,2	79,1	0,8	91,2	0,0606	2,9032	2,1105	0,1624
5	04/08/2015	4	8	2015	0	24	12,4	27,7	67,20	67,20	0,80	20,1	67,2	0,6	91,2	0,0606	2,5772	1,5762	0,1451
6	07/10/2015	7	10	2015	0	24	14,0	31,6	69,40	69,40	1,01	22,8	69,4	0,8	91,2	0,0606	3,1235	1,9263	0,1681
7	12/02/2016	12	2	2016	0	24	17,0	28,3	74,60	74,60	1,10	22,7	74,6	0,8	91,2	0,0606	2,8921	2,0519	0,1668
8	16/04/2016	16	4	2016	0	24	18,0	31,6	78,70	78,70	0,77	24,8	78,7	0,6	91,2	0,0606	3,3562	2,4635	0,1867

FONTE: O Autor (2021); Souza (2018a)

A constante psicrométrica (γ_{psy}) foi obtida por meio da seguinte equação:

$$\gamma_{psy} = a_{psy} \cdot P$$

Sendo: γ_{psy} – constante psicrométrica (kPa °C⁻¹); a_{psy} – coeficiente dependente do tipo de ventilação do bulbo úmido ($a_{psy} = 0,000665$ °C⁻¹ para psicrômetros de ventilação natural); P – pressão atmosférica (kPa).

A determinação da pressão atmosférica (P) foi realizada com uma simplificação da lei do gás ideal, considerando a temperatura de 20 °C para atmosfera padrão:

$$P = 101,3 \cdot \left(\frac{293 - 0,0065 \cdot Z}{293} \right)^{5,26}$$

Sendo: P – pressão atmosférica (kPa); Z – altitude (m).

A pressão de vapor (e_s) foi calculada por meio da seguinte equação:

$$e_s = \frac{e^0(T_{máx}) + e^0(T_{mín})}{2}$$

Sendo: e_s – pressão de saturação do vapor (kPa); $e^0(T_{máx})$ – pressão de saturação do vapor com base na temperatura máxima diária do ar (kPa); $e^0(T_{mín})$ – pressão de saturação do vapor com base na temperatura mínima diária do ar (kPa).

A pressão de saturação do vapor a temperatura “ T ” do ar [$e^0(T)$] foi obtido com a seguinte equação:

$$e^0(T) = 0,6108 \cdot e^{\left(\frac{17,27 \cdot T}{T + 237,3}\right)}$$

Sendo: $e^0(T)$ – pressão de saturação do vapor na temperatura “ T ” do ar (kPa); T – temperatura do ar (°C); e – base do logaritmo neperiano (2,7183) elevada a potência (adimensional).

A declinação da curva de pressão de saturação do vapor (Δ) foi determinada com a relação:

$$\Delta = \frac{4098 \cdot e^0(T_{med})}{(T_{med} + 237,3)^2}$$

Sendo: Δ – declividade da curva de pressão de saturação do vapor (kPa °C⁻¹); $e^0(T_{med})$ – pressão de saturação do vapor com base na temperatura média diária do ar (kPa); T_{med} – temperatura média diária (°C).

A pressão atual de vapor (ea) foi estabelecida utilizando dados diários de umidade relativa média do ar, empregando a equação abaixo:

$$ea = \frac{UR_{med}}{100} \cdot \left[\frac{e^0(T_{máx}) + e^0(T_{mín})}{2} \right]$$

Sendo: ea – pressão atual do vapor (kPa); UR_{med} – umidade relativa média diária do ar (adimensional); $e^0(T_{máx})$ – pressão de saturação do vapor com base na temperatura máxima diária do ar (kPa); $e^0(T_{mín})$ – pressão de saturação do vapor com base na temperatura mínima diária do ar (kPa).

A radiação solar no topo da atmosfera (Ra) para períodos diários foi calculada utilizando a equação:

$$Ra = \frac{1440}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot d_r \cdot [(\omega_s \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta) + (\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s)]$$

Sendo: Ra – radiação solar no topo da atmosfera (MJ m⁻² dia⁻¹); G_{sc} – constante solar (0,0820 MJ m⁻² min⁻¹); d_r – distância relativa Terra-Sol (adimensional); ω_s – ângulo horário correspondente ao pôr do sol (radianos); φ – latitude (radianos); δ – declinação solar (radianos).

Se a latitude obtida estiver em graus, é necessária à sua conversão para radianos utilizando a relação:

$$\varphi_{\text{radianos}} = \varphi_{\text{graus}} \cdot \frac{\pi}{180}$$

Os valores referentes à distância relativa Terra-Sol (d_r) e declinação solar (δ) foram obtidos empregando as seguintes equações:

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J\right)$$

$$\delta = 0,409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J - 1,39\right)$$

Sendo: d_r – distância relativa Terra-Sol (adimensional); δ – declinação solar (radianos); J – dia juliano (dias).

O ângulo horário correspondente ao pôr do sol (ω_s) foi calculado com a seguinte equação:

$$\omega_s = \arccos(-\tan \varphi \cdot \tan \delta)$$

Sendo: ω_s – ângulo horário correspondente ao pôr do sol; φ – latitude (radianos); δ – declinação solar (radianos).

A radiação solar incidente R_s ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) foi calculada conforme equação de Hargreaves-Samani, utilizando a expressão:

$$R_s = K_{RS} \cdot R_a \cdot \sqrt{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}$$

Sendo: R_s – radiação solar incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); K_{RS} – coeficiente de proporcionalidade ($^{\circ}\text{C}^{-0,5}$); R_a – radiação solar no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); T_{max} – temperatura máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$); T_{min} – temperatura mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$).

A radiação solar em céu sem nuvens R_{so} ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) foi determinada com a seguinte equação:

$$R_{so} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} Z) \cdot R_a$$

Sendo: R_{so} – radiação solar em céu sem nuvem ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); Z – altitude do local (m); R_a – radiação solar no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

O saldo de radiação de ondas curtas R_{ns} ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) foi calculado com a equação:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \cdot R_s$$

Sendo: R_{ns} – saldo de radiação de ondas curtas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); α – albedo ou coeficiente de reflexão da cultura hipotética ($\alpha = 0,23$; adimensional); R_s – radiação solar incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

Considerando que outros materiais como CO_2 e poeira, os quais absorvem e emitem ondas longas estão em concentração constante, utilizou-se a equação a seguir para estimar o saldo de ondas longas R_{nl} ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$):

$$R_{nl} = \sigma \cdot \left[\frac{(T_{m\acute{a}x})^4 + (T_{m\acute{i}n})^4}{2} \right] \cdot (0,34 - 0,14 \cdot \sqrt{ea}) \cdot \left(1,35 \cdot \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right)$$

Sendo: R_{nl} – saldo de radiação de ondas longas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); σ – constante de *Stefan-Boltzmann* ($4,903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); $T_{m\acute{a}x}$ – temperatura máxima absoluta registrada no período de 24 horas (K); $T_{m\acute{i}n}$ – temperatura mínima absoluta registrada no período de 24 horas (K); ea – pressão atual do vapor (kPa); R_s/R_{so} – radiação relativa de ondas curtas (limitada para $\leq 1,0$); R_s – radiação solar incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); R_{so} – radiação solar em céu sem nuvem ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

O saldo de radiação R_n ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) foi determinado com a expressão:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

Sendo: R_n – saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); R_{ns} – saldo de radiação de ondas curtas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); R_{nl} – saldo de radiação de ondas longas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

A FAO (ALLEN et al., 1998) considera o fluxo de calor no solo (G) igual a zero para períodos diários.

A velocidade do vento (u_z) utilizada foi à obtida nas estações meteorológicas utilizadas no presente estudos. Todas as estações foram medidas a 10 metros de altura em relação à superfície do solo, sendo corrigida para altura de dois metros (u_2) de altura com a equação:

$$u_2 = u_z \cdot \left(\frac{4,87}{\ln(67,8 \cdot z - 5,42)} \right)$$

Sendo: u_2 – velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1}); u_z – velocidade do vento “z” metros acima da superfície do solo (m s^{-1}); z – altura da medida da velocidade do vento (m).

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G. et al. **Crop Evapotranspiration**: guidelines for computing crop water requirements. 56. ed. U.s.A: Fao Irrigation And Drainage Paper, 1998. 327 p.

ALLEN, R. G.. “*REF-ET, Reference Evapotranspiration Calculator Version Windows 2.0.*” Univ. of Idaho Res. and Ext. Center, Kimberly, ID, 82 p. 2000.

ASCE-EWRI (New York). American Society of Civil Engineers. **The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation**. New York: American Society of Civil Engineers, 2005. 70 p. Task Committee Report.

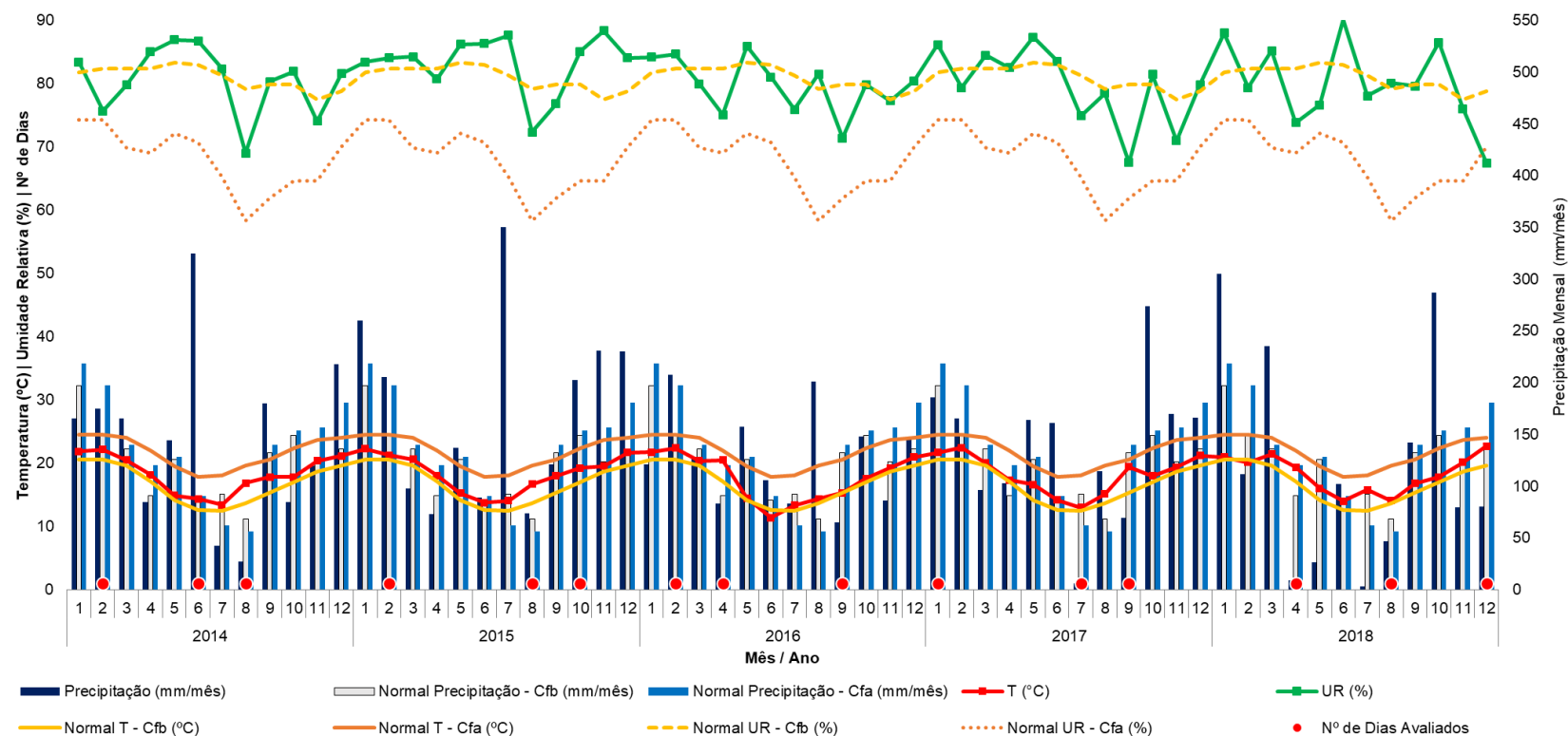
PEREIRA A. R. et al. *Evapo(Transpi)Ração*. 1ed. Piracicaba, SP: Fundação de Estudos Agrários Luiz De Queiroz; 1997.

SOUZA, J. L. M. **Plataforma Moretti**. 2018a. Disponível em: <http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/index.htm>. Acesso em: 15 out. 2020.

SOUZA, J. L. M. **Ciclo da água na agricultura: fundamentos para o estudo do sistema solo-planta-atmosfera**. Curitiba: Plataforma Moretti/DSEA/SCA/UFPR, 2018b. (Manual didático).

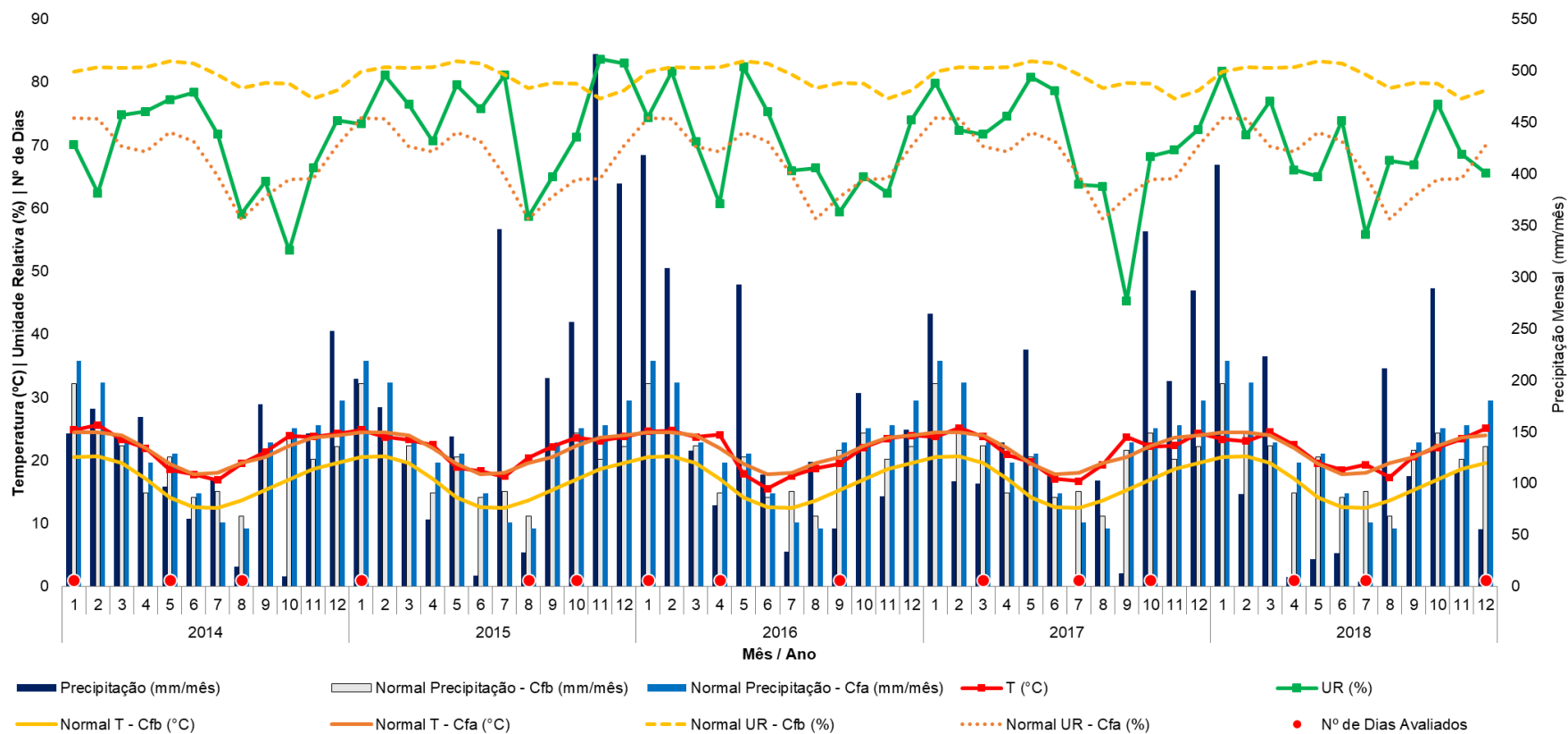
APÊNDICE 5 – VALORES MENSAIS DE TEMPERATURA MÉDIA (T) E UMIDADE RELATIVA MÉDIA (UR) DO AR, PRECIPITAÇÃO E NÚMERO DE DIAS AVALIADOS NAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS ANALISADAS, PARA TODOS OS DIAS NO PERÍODO ENTRE 2014 E 2018, NA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIBAGI (BHRT), E NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DOS CLIMAS DAS ESTAÇÕES

FIGURA A5.1 – VALORES MENSAIS DE TEMPERATURA MÉDIA (T) E UMIDADE RELATIVA MÉDIA (UR) DO AR, PRECIPITAÇÃO E NÚMERO DE DIAS AVALIADOS NA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA FERNANDES PINHEIRO DO IAPAR (FPO-IPR), PARA TODOS OS DIAS NO PERÍODO ENTRE 2014 E 2018, NA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIBAGI (BHRT), E NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DOS CLIMAS Cfa (MARINGÁ) E Cfb (CASTRO).



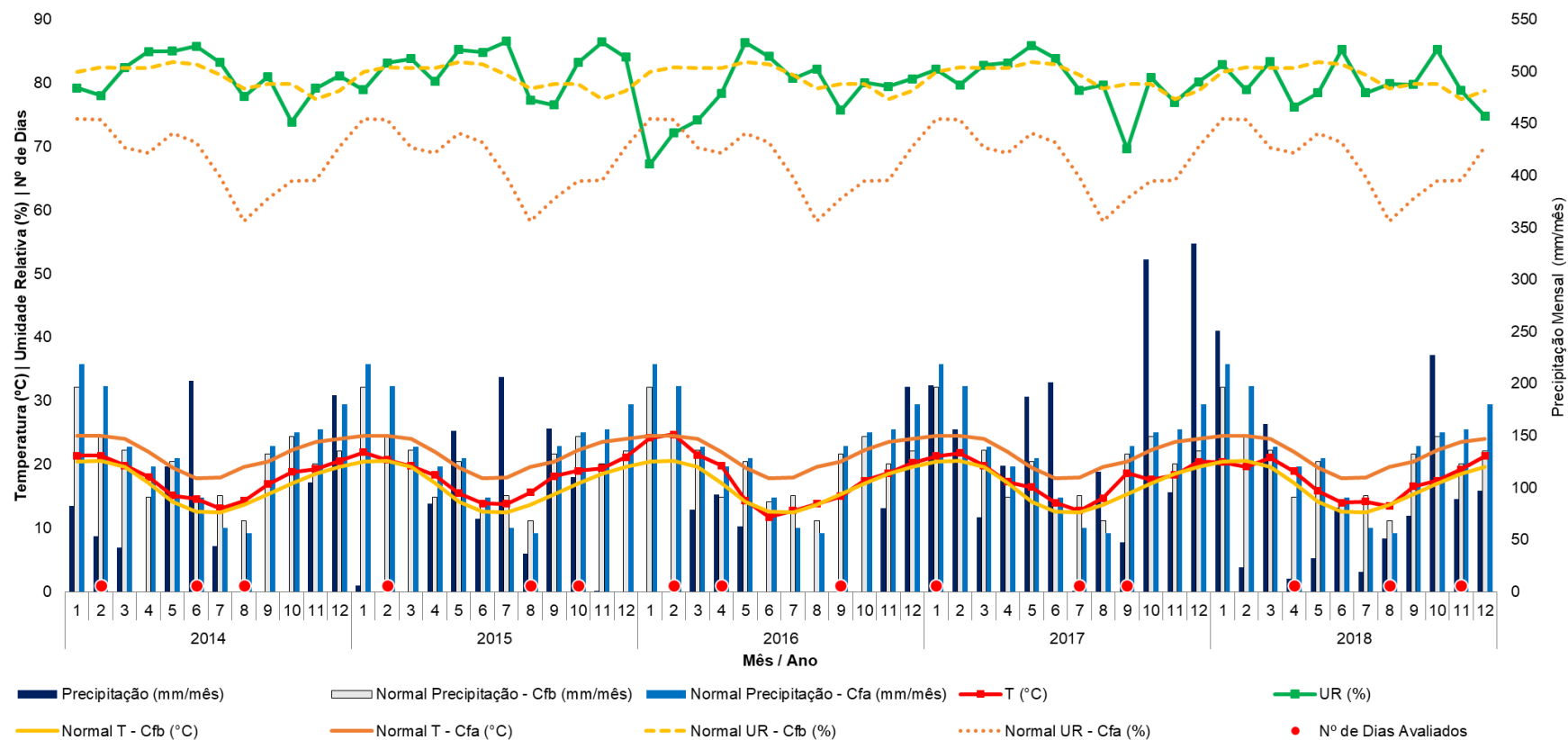
FONTE: O Autor (2021); INMET (2020)

FIGURA A5.2 – VALORES MENSAIS DE TEMPERATURA MÉDIA (T) E UMIDADE RELATIVA MÉDIA (UR) DO AR, PRECIPITAÇÃO E NÚMERO DE DIAS AVALIADOS NA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA LONDRINA DO IAPAR (LDA-IPR), PARA TODOS OS DIAS NO PERÍODO ENTRE 2014 E 2018, NA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIBAGI (BHRT), E NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DOS CLIMAS Cfa (MARINGÁ) E Cfb (CASTRO).



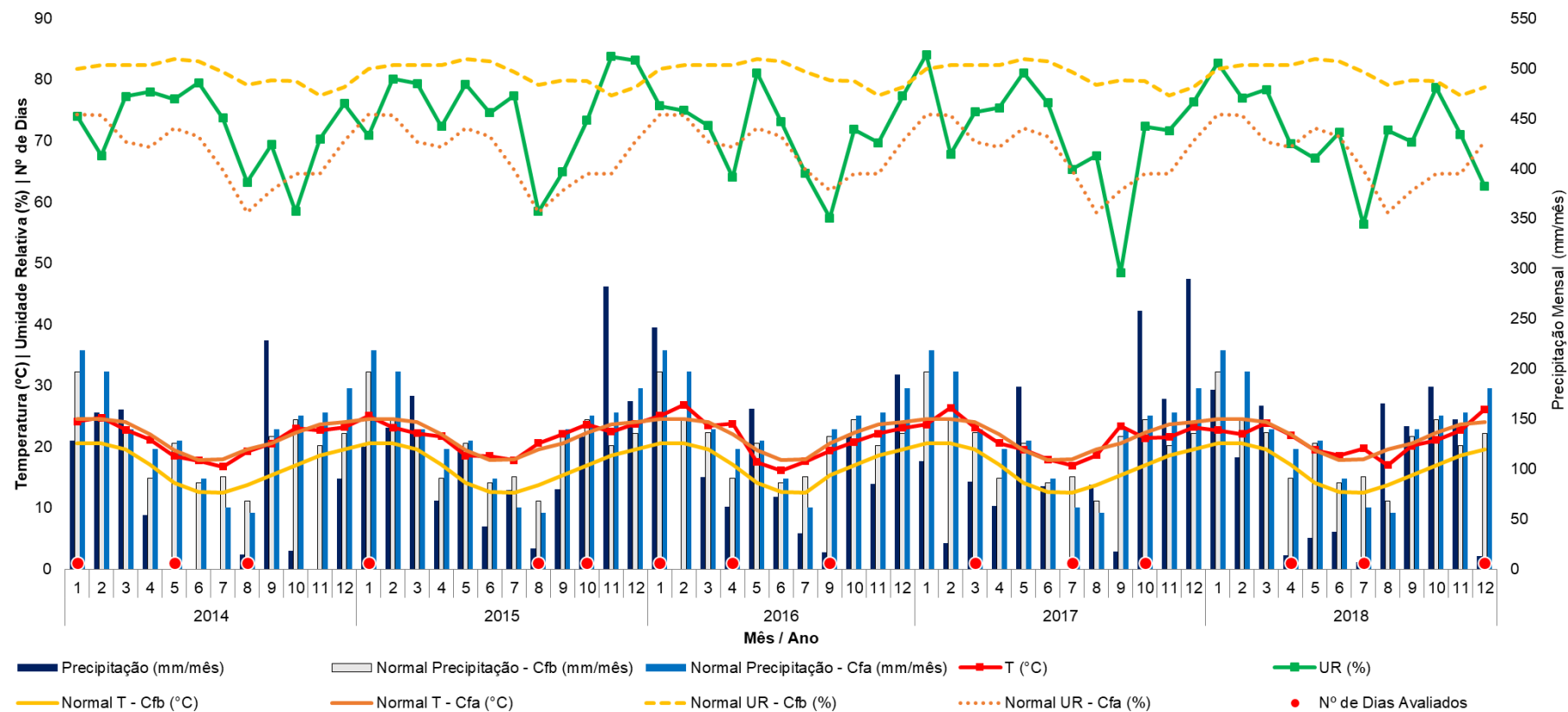
FONTE: O Autor (2021); INMET (2020)

FIGURA A5.3 – VALORES MENSAIS DE TEMPERATURA MÉDIA (T) E UMIDADE RELATIVA MÉDIA (UR) DO AR, PRECIPITAÇÃO E NÚMERO DE DIAS AVALIADOS NA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA CASTRO DO INMET (CAS-IMT), PARA TODOS OS DIAS NO PERÍODO ENTRE 2014 E 2018, NA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIBAGI (BHRT), E NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DOS CLIMAS Cfa (MARINGÁ) E Cfb (CASTRO).



FONTE: O Autor (2021); INMET (2020)

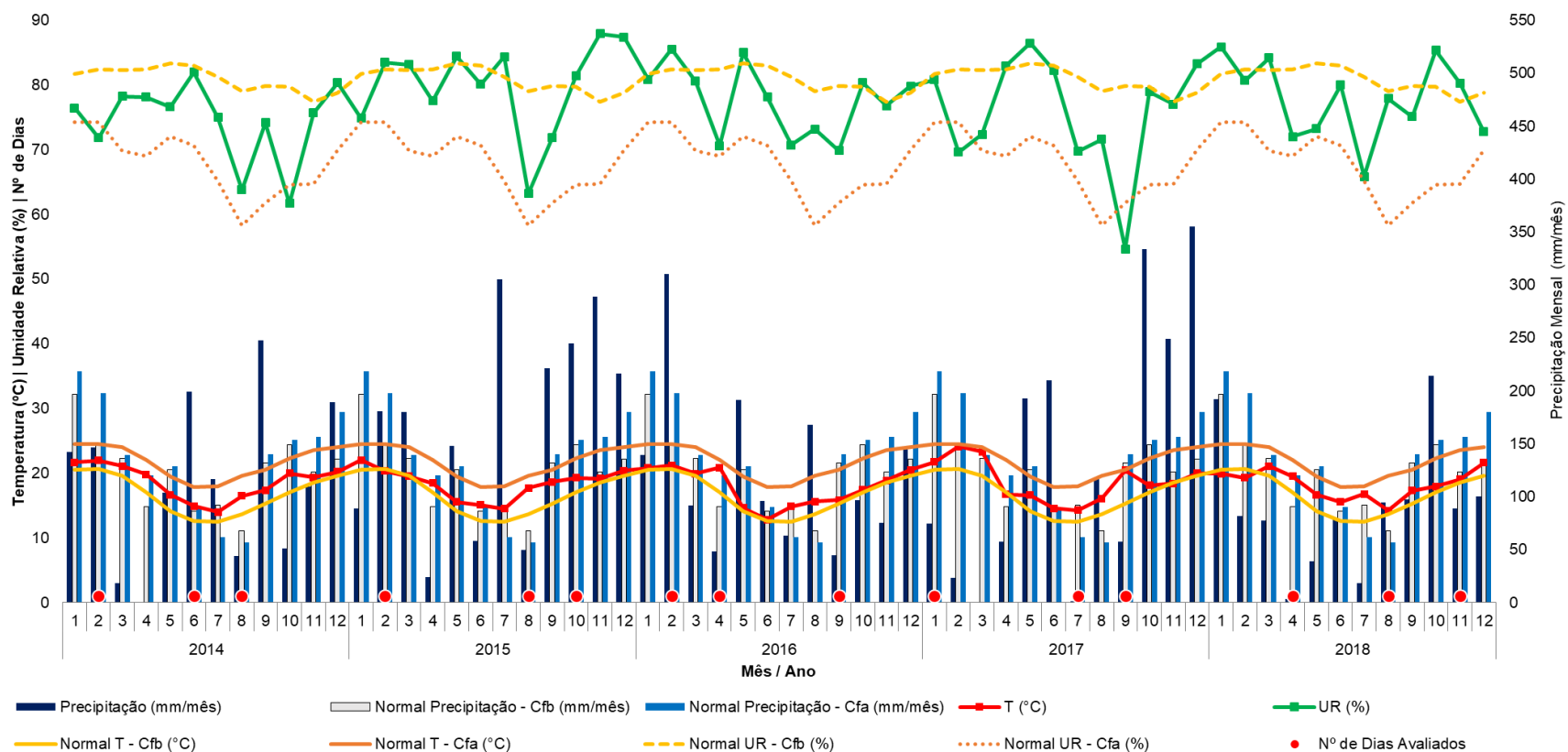
FIGURA A5.4 – VALORES MENSAIS DE TEMPERATURA MÉDIA (T) E UMIDADE RELATIVA MÉDIA (UR) DO AR, PRECIPITAÇÃO E NÚMERO DE DIAS AVALIADOS NA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA NOVA FÁTIMA DO INMET (NFT-IMT), PARA TODOS OS DIAS NO PERÍODO ENTRE 2014 E 2018, NA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIBAGI (BHRT), E NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DOS CLIMAS Cfa (MARINGÁ) E Cfb (CASTRO).



(¹) Em todos os dias do mês de agosto de 2016 não houve leitura da estação para as variáveis T , UR e P , sendo então retirado da série de dados.

FONTE: O Autor (2021); INMET (2020)

FIGURA A5.5 – VALORES MENSIS DE TEMPERATURA MÉDIA (T) E UMIDADE RELATIVA MÉDIA (UR) DO AR, PRECIPITAÇÃO E NÚMERO DE DIAS AVALIADOS NA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA VENTANIA DO INMET (VTN-IMT), PARA TODOS OS DIAS NO PERÍODO ENTRE 2014 E 2018, NA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIBAGI (BHRT), E NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DOS CLIMAS Cfa (MARINGÁ) E Cfb (CASTRO).



FONTE: O Autor (2021); INMET (2020)

REFERÊNCIAS

INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). **Normais Climatológicas do Brasil**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso em: 27 maio 2020.