



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

TATIANA VANESSA DOS SANTOS

**ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO NO BAIXO SÃO
FRANCISCO COM USO DE MODELO FAO E SENSORIAMENTO REMOTO**

**MACEIÓ-AL
AGOSTO, 2019**

TATIANA VANESSA DOS SANTOS

ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO NO BAIXO SÃO
FRANCISCO COM USO DE MODELO FAO E SENSORIAMENTO REMOTO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, na área de concentração em Processos de Superfície Terrestre, do Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Ferreira
Carlos de Amorim

Coorientador: PhD Humberto Alves
Barbosa

MACEIÓ-AL
AGOSTO, 2019

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central

Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

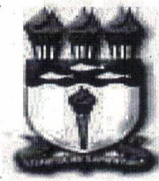
S237e Santos, Tatiana Vanessa dos.
Estimativa da evaporação e evapotranspiração no Baixo São Francisco com uso de modelo FAO e sensoriamento remoto / Tatiana Vanessa dos Santos. – 2019.
118 f. : il., grafs., tabs. color.

Orientador: Ricardo Ferreira Carlos de Amorim.
Coorientador: Humberto Alves Barbosa.
Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2019.

Bibliografia: f. 108-116.
Apêndices: f. 117-118.

1. Ciclo hidrológico. 2. Evaporação (Meteorologia). 3. Evapotranspiração. 4. Modelo Penman-Monteith. 5. Sensoriamento remoto. 5. São Francisco, Rio. I.
Título.

CDU: 551.573 (282.281.5)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO

N.º de ordem: MET-UFAL-MS-165.

**“ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO NO
BAIXO SÃO FRANCISCO COM O USO DO MODELO FAO E
SENSORIAMENTO REMOTO”**

Tatiana Vanessa dos Santos

Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Aprovado pela Banca Examinadora composta por:

Prof. Dr. Ricardo Ferreira Carlos de Amorim
(Orientador)

Profa. Dra. Maria Luciene Dias de Melo
(Membro Interno)

Prof. Dr. Ranieri Carlos Ferreira de Amorim
(Membro Externo)

Prof. Dr. Ednaldo Araújo Mendonça
(Membro Externo)

Agosto/2019

DEDICATÓRIA

*A Deus pela oportunidade de viver,
À minha mãe, Neuza, meu alicerce na vida e meu maior tesouro,
À minha família, que me proporcionou essa caminhada e, em
especial, ao meu sobrinho Arthur Felipe, que esteve comigo nos
momentos finais da construção desse trabalho.*

AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo.

À minha mãe, Neuza Maria, pelo amor e carinho a mim dedicados, bem como aos meus irmãos e, em especial, à minha querida irmã Fabiane Cristine, pela força e apoio em todos os momentos que me ajudou a superar as dificuldades encontradas.

Aos meus sobrinhos Arthur Felipe, Louise Teodoro, Laura Teodoro, Letícia e Brenda, presentes de Deus em nossas vidas, pelo seu amor, carinho, alegria e momentos de descontração. Aos meus familiares de uma forma geral, que diretamente ou indiretamente me ajudaram nessa etapa da minha vida.

Aos meus amigos da vida que respeitaram a minha ausência nos momentos de estudo. Aos os meus amigos do curso de mestrado que estiveram comigo nos momentos de estudos e pesquisas.

Agradeço especialmente aos amigos do Laboratório de Análise e Processamento de Imagens de Satélite: Leandro, Eduardo, Anselmo, Carlos Alejandro, Emerson e tantos os outros que passaram e contribuíram grandemente na construção do conhecimento coletivo.

Quero fazer um agradecimento especial ao meu amigo Edson Matias que me ajudou durante toda a vida acadêmica e, durante a Pós-graduação, não economizando esforços para sempre me dar um apoio. Agradeço aos “scripts” construídos. São seus os créditos meu amigo.

Ao meu grande amigo e pesquisador Washington Filho, uma pessoa que admiro muito, pela valiosa orientação nesse trabalho e outros momentos construtivos para a pesquisa, e principalmente pelas conversas, incentivos, ensinamentos e apoio em todos os momentos.

Aos amigos da turma do Mestrado que muito me ajudaram na caminhada: Ismael Guidson, Gomes Muanza, Edson Matias, Clovis Isaac, Lívia Pilar, Aline Inácio, Marcelo Lopes, Iwd’son Guilherme, Hugo Cainã e Davi Duarte.

À Universidade Federal de Alagoas, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia pela oportunidade oferecida e ao Instituto de Ciências Atmosféricas (ICAT) pela oportunidade de continuar os meus estudos. Em nome da mesma, agradeço aos técnicos, alunos e professores que encontramos e convivemos no dia a dia.

Agradeço imensamente aos professores do Mestrado, Roberto Lyra, Heliofábio Gomes, Ricardo Amorim, Humberto Barbosa, Luciene Melo, Natália Fedorova, Vladimir Levit, Rosiberto Salustiano, Geórgenes Hilário, Fabrício Daniel, Djane Fonseca e Ricardo Tenório, que realizaram o trabalho com muito zelo e competência.

Ao CNPq pelo apoio financeiro. Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e a EMBRAPA AgriTempo pelo fornecimento dos dados de superfície.

Ao meu coorientador Professor Humberto Alves Barbosa, pela oportunidade de participar de sua equipe durante o curso de graduação e Pós-graduação, onde pude aprender muitas ferramentas na área de sensoriamento remoto.

Ao meu orientador Professor Ricardo Ferreira Carlos de Amorim, que me integrou à sua equipe e, que tanto contribuiu pacientemente para minha formação e crescimento profissional.

“Com todos vocês aprendi para a vida”! Obrigada!

EPÍGRAFE

*Transportai um punhado de terra todos os dias
e fareis uma montanha.*

Confúcio

RESUMO

Um dos fatores mais importantes em qualquer programa de gerenciamento dos recursos hídricos é ter o conhecimento sobre os processos naturais que regulam o ciclo hidrológico, com sua dinâmica espacial e temporal, principalmente quando se trata de análises espaciais e temporais desses processos. O objetivo desse estudo foi estimar a evaporação e evapotranspiração no Baixo São Francisco (BSF), com uso de modelo da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) e sensoriamento remoto, no período de 2009 a 2018. A metodologia utilizada para a realização desse trabalho pontuou inicialmente, no preenchimento de falhas para dados de superfície, utilizando o método estatístico média preditiva (Predictive Mean Matching-PMM). Após validação do método, pôde-se estimar a Evaporação (E) pelo método de Penman (1948) e Evapotranspiração de referência (ET_o) pelo método de PM-FAO. Em detrimento das análises estatísticas realizadas, os valores de r e do REQM das estações mostraram que o método de preenchimento foi eficaz e gerou valores confiáveis, levando a aceitação dos seus resultados, complementando assim as falhas nas séries. Pode-se considerar as estatísticas descritivas realizadas para os dados estimados, onde que de um modo geral a E e ET_o na região de estudo apresentaram uma baixa dispersão dos dados com relação à média, indicando que este parâmetro (a média) é um bom estimador para representação. Um outro parâmetro meteorológico utilizado no trabalho foi o produto ETr (Evapotranspiração real) obtido através do LSA-SAF, para comparação com os dados de superfície, apesar dela ter tido alta dispersão para todas as localidades. Após, comprovação estatística, verificou-se com os resultados que a dinâmica temporal da Evaporação foi bem similar ao da evapotranspiração na maior parte das localidades de estudo para o BSF, tendo apenas valores diferentes nos seus máximos e mínimos. Para valores médios anuais referente ao período de estudo a (E), (ET_o) e (ETr) tiveram seus maiores valores médios respectivamente de 1482,66, 1711,2 e 774,0 mm/ano para Brejo Grande (SE), Pão de Açúcar (AL) e Propriá (SE). Os menores valores, respectivamente foram 1264,2, 1523,6 e 225,9 mm/ano para Traipú (AL), Arapiraca (AL) e Pão de Açúcar (AL). A partir desses resultados, verificou-se que a ETr obteve valores baixos, mas que comparado com trabalhos em outras regiões fisiograficamente semelhantes apresentaram resultados similares. São necessários outros estudos para comprovação desse produto em regiões semiáridas para validação em nossa região. Contudo, o trabalho obteve bons resultados para os demais parâmetros, se comparado com outros estudos já realizados na Bacia Hidrográfica do São Francisco.

Palavras chave: Evaporação. Evapotranspiração. Estimativa. Baixo São Francisco.

ABSTRACT

One of the most important factors in any water management program is having knowledge about the natural processes that regulate the water cycle, with their spatial and temporal dynamics, especially when it comes to spatial and temporal analyzes of these processes. The aim of this study was to estimate evaporation and evapotranspiration in Lower San Francisco, using model from Food and Agriculture Organization (FAO) and remote sensing, from 2009 to 2018. The methodology used to perform this work initially scored in filling data gaps. using the Predictive Mean Matching-PMM method. After validation of the method, it was possible to estimate Evaporation (E) by the Penman method (1948) and Reference Evapotranspiration (ET_o) by the PM-FAO method. In detriment of the statistical analyzes performed, the *r* and REQM values of the stations showed that the filling method was effective and generated reliable values, leading to the acceptance of its results, thus complementing the failures in the series. It can be considered the descriptive statistics performed for the estimated data, where in general the E and ET_o in the study region presented a low dispersion of the data in relation to the average, indicating that this parameter (the average) is a good estimator for representation. Another meteorological parameter used in the work was the product ETr (Evapotranspiration Real) obtained through from LSA-SAF, for comparison with surface data, although it had high dispersion for all locations. After statistical proof, it was found from the results that the temporal dynamics of Evaporation were very similar to that of evapotranspiration in most BSF study sites, with only different values at their maximum and minimum values. For annual mean values for the study period, the (E), (ET_o) and (ETr) had their highest mean values respectively of 1482.66, 1711.2 and 774.0 mm / year for Brejo Grande (SE), Pão de Açúcar (AL) and Propriá (SE). The lowest values, respectively, were 1264.2, 152.6 and 225.9 mm / year for Traipú (AL), Arapiraca (AL) and Pão de Açúcar (AL). From these results, it was found that the ETr obtained low values, but compared to studies in other physiographically similar regions showed similar results. Further studies are needed to prove this product in semiarid regions for validation in our region. However, the work obtained good results for the other parameters, compared to other studies already carried out in the São Francisco Watershed.

Keywords: Evaporation. Evapotranspiration. Estimate. Low São Francisco.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 01** – Representação esquemática de um estômato27
- Figura 02** – Processo de Evapotranspiração (ET).....28
- Figura 03** – Dados médios de Evaporação (mm/dia) (a) e Precipitação média (mm/ano) (b) com dados do INMET (1961-2014).....40
- Figura 04** – Localização da área de estudo. Na Figura letra (A) está representado um mapa das bacias hidrográficas brasileiras com destaque em círculo para o Baixo São Francisco e na Figura da letra (B) o mapa hipsométrico do BSF.45
- Figura 05** – Fluxograma da metodologia adotada para estimativa da evaporação e evapotranspiração no Baixo São Francisco.47
- Figura 06** – Esquema das principais etapas usadas na imputação múltipla (IM).51
- Figura 07** – Grade com preditores utilizados para o preenchimento de falhas das estações do Baixo São Francisco.55
- Figura 08** – Representação esquemática da composição do pixel.....62
- Figura 09** – Diagrama simplificado de cadeia de processamento da Evapotranspiração (ET) com suas bases de entrada de dados.65
- Figura 10** – Gráfico de barras com média do acumulado mensal da precipitação no BSF para Arco Verde (barra verde), Arapiraca (barra azul), Brejo Grande (barra violeta), Pão de Açúcar (barra vermelha), Piranhas (barra amarela), Propriá (barra laranja) e Traipú (barra marrom), para o período de 2009 a 2018.77
- Figura 11** – Boxplot da média diária ($\text{mm}/\text{dia}^{-1}$) da Evaporação (E), nos doze meses do ano, para as estações de Arco Verde (a), Arapiraca (b), Brejo Grande (c), Pão de Açúcar (d), Piranhas (e), Traipú (f) e Propriá (g). Gráfico de barras do acumulado médio mensal (h) para o período de 2009 a 2018 .82
- Figura 12** – Boxplot da variação do total anual médio de Evaporação (E) ($\text{mm}.\text{mês}^{-1}$), observada na estação meteorológica do município de Arco Verde, representante da Sub-bacia do Alto Ipanema, para o período de 2009 a 2018.86
- Figura 13** – Boxplot da variação do total anual médio da Evaporação (E) ($\text{mm}.\text{mês}^{-1}$) observada nas estações meteorológicas dos municípios de Arapiraca (a),

- Pão de Açúcar (b), Piranhas (c) e Traipú (d), representantes da Sub-bacia do Baixo São Francisco (AL), para o período de 2009 a 2018.....87
- Figura 14** – Boxplot da variação da média anual da Evaporação (E) (mm.mês^{-1}) observada nas estações meteorológicas dos municípios de Brejo grande (a) e Propriá (b), representantes da Sub-bacia do Baixo São Francisco (SE), para o período de 2009 a 2018.88
- Figura 15** – Boxplot média diária (mm.dia^{-1}) da Evapotranspiração de referência (ETo) para as estações de Arco Verde (a), Arapiraca (b), Brejo Grande (c), Pão de Açúcar (d), Piranhas (e), Traipú (f) e Propriá (g). Gráfico de barras do acumulado médio mensal (h) para o período de 2009 a 2018. 90
- Figura 16** – Boxplot da variação do total médio anual da Evapotranspiração de referência (ETo) (mm.mês^{-1}) observada na estação meteorológica do município de Arco Verde, representante da Sub-bacia do Alto Ipanema, para o período de 2009 a 2018.93
- Figura 17** – Boxplot da variação do total médio anual da Evapotranspiração de referência (ETo) (mm.mês^{-1}) observada nas estações meteorológicas dos municípios de Arapiraca (a), Pão de Açúcar (b), Piranhas (c) e Traipú (d), representantes da Sub-bacia do Baixo São Francisco (AL), para o período de 2009 a 2018.....94
- Figura 18** – Boxplot da variação do total médio anual da Evapotranspiração de referência (ETo) (mm.mês^{-1}) observada nas estações meteorológicas dos municípios de Brejo grande (a) e Propriá (b), representantes da Sub-bacia do Baixo São Francisco (SE), para o período de 2009 a 2018.95
- Figura 19** – Boxplot média diária (mm.dia^{-1}) da Evapotranspiração Real (ETr) para as estações de Arco Verde (a), Arapiraca (b), Brejo Grande (c), Pão de Açúcar (d), Piranhas (e), Traipú (f) e Propriá (g). Gráfico de barras do acumulado médio mensal (h) para o período de 2011 a 2018.97
- Figura 20** – Boxplot da variação do total média anual da Evapotranspiração Real (ETr) (mm.mês^{-1}) observada na estação meteorológica do município de Arco Verde, representante da Sub-bacia do Alto Ipanema, para o período de 2011 a 2018..... 100
- Figura 21** – Boxplot da variação do total médio anual da Evapotranspiração Real (ETr) (mm.mês^{-1}) observada nas estações meteorológicas dos municípios de Arapiraca (a), Pão de Açúcar (b), Piranhas (c) e Traipú (d),

representantes da Sub-bacia do Baixo São Francisco (AL), para o período de 2011 a 2018.....	101
Figura 22 – Boxplot da variação do total anual da Evapotranspiração Real (ETr) (mm.mês ⁻¹) observada nas estações meteorológicas dos municípios de Brejo grande (a) e Propriá (b), representantes da Sub-bacia do Baixo São Francisco (SE), para o período de 2011 a 2018.....	102
Figura 23 – Gráfico de barras do acumulado anual de Evaporação, Evapotranspiração de referência, Evapotranspiração real e Precipitação para Arco Verde (PE), representante da Sub-bacia do Alto Ipanema, período de 2009 a 2018.	103
Figura 24 – Gráfico de barras do cumulado anual de Evaporação, Evapotranspiração de referência, Evapotranspiração real e Precipitação para Arapiraca (AL), Pão de Açúcar (AL), Piranhas (AL) e Traipú (AL), representantes da Sub-bacia do Baixo São Francisco (AL), período de 2009 a 2018.	104
Figura 25 – Gráfico de barras do acumulado anual de Evaporação, Evapotranspiração de referência, Evapotranspiração real e Precipitação para Brejo Grande (SE), Propriá (SE), representantes da Sub-bacia do Baixo São Francisco (SE), período de 2009 a 2018.....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 -	Características espectrais dos canais do SEVIRI (VIS-Visível, IR-Infravermelho, HRV-Visível Alta Resolução (High Resolution Visible).....	36
Tabela 02 -	Estatística descritiva da ETo anual por região fisiográfica da bacia hidrográfica do rio São Francisco. DesvPad (Desvio Padrão).....	43
Tabela 03 -	Estações meteorológicas do Baixo São Francisco utilizadas no estudo pertencentes ao INMET e EMBRAPA.....	48
Tabela 04 -	Dados meteorológicos utilizados na pesquisa das respectivas estações (AUT-Automática, CONV-Convencional e AGR-Agritempo/Embrapa).....	48
Tabela 05 -	Exemplificação de dados imputados, representados por NA, referentes à estação de Pão de Açúcar-AL (código OMM: 81994) (a), e dados com as falhas preenchidas (b). Os dados originais (coluna OBS) estão ao lado das séries gradeadas mais próximas, ou conjunto de preditores (Gr1; Gr2; Gr3 e Gr4). As falhas preenchidas estão destacadas em vermelho.....	54
Tabela 06 -	Coeficiente de correlação estatística ou coeficiente de correlação de Pearson.....	56
Tabela 07 -	Características do produto de Evapotranspiração DMET-LSA/SAF.....	61
Tabela 08 -	Parâmetros da equação 23 calculados pelas Equações 24 a 38.....	70
Tabela 09 -	Percentual de falhas (%) correspondente a um total de 3.652 dados para as variáveis de cada estação. Temperatura máxima (Tmax), Temperatura mínima (Tmin), Temperatura do ponto de orvalho (Tdew), Umidade relativa (UR), Insolação (Ins), Radiação solar global (Rs), Pressão atmosférica (P), Velocidade do vento (U2) e Precipitação (Prec). Em destaque na cor cinza, o percentual do maior valor de falhas.....	74
Tabela 10 -	Valores de r (coeficiente de correlação) e do REQM Raíz do Erro Quadrático Médio) para as variáveis Temperatura máxima (Tmax), Temperatura mínima (Tmin), Temperatura do ponto de orvalho (Tdew), Umidade relativa (UR). Valores com nível de significância de 5%.....	75
Tabela 11 -	Valores de r (coeficiente de correlação) e do REQM Raíz do erro Quadrático Médio) para as variáveis Radiação solar global (Rs), Pressão atmosférica (P), Velocidade do vento (U2) e Precipitação (Prec). Valor de r abaixo de 0,65 para velocidade do vento está destacado em cinza. Valores com nível de	

	significância de 5%.....	76
Tabela 12 -	Valores médios mensais de Precipitação (mm) (Prec), Radiação solar global (MJ.m-2.dia-1) (Rs), Temperatura média (°C) (Tmed), Umidade relativa (%) (UR) e Velocidade do vento (m/s) (U2), para as estações de Arco Verde (PE), Arapiraca (AL), Brejo Grande (SE), Pão de Açúcar (AL), Piranhas (AL), Propriá (SE) e Traipú (AL), referente ao período de 2009 a 2018. Maiores valores médios em cor cinza e menores valores em cor amarela.....	80
Tabela 13 -	Estatística descritiva de 2009 a 2018, referente aos valores médios mensais de Evaporação (E) das Estações de Arco Verde (PE), Arapiraca (AL), Brejo Grande (SE), Pão de Açúcar (AL), Piranhas (AL), Propriá (SE) e Traipú (AL). *DP e CV.....	84
Tabela 14 -	Estatística descritiva de 2009 a 2018, referente aos valores médios mensais de Evapotranspiração de referência (ETo) das Estações de Arco Verde (PE), Arapiraca (AL), Brejo Grande (SE), Pão de Açúcar (AL), Piranhas (AL), Propriá (SE) e Traipú (AL).....	92
Tabela 15 -	Estatística descritiva de 2011 a 2018, referente aos valores médios mensais de Evapotranspiração real (ETr) das Estações de Arco Verde (PE), Arapiraca (AL), Brejo Grande (SE), Pão de Açúcar (AL), Piranhas (AL), Propriá (SE) e Traipú (AL). *DP e CV.....	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ASAS	Anticiclones Subtropical do Atlântico Sul
BC	Blaney-Criddle
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
BHSF	Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco
BM	Brisas Marítimas
BOC	Balanço de Ondas Curtas
BOL	Balanço de Ondas Longas
BSF	Baixo São Francisco
BT	Brisas Terrestres
CBHSF	Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco
CRLE	Relação Complementar de Evaporação em Lago
CV	Coeficiente de Variação
DSLFL	Fluxo de Ondas Longas de Superfície Descendente
DSSFL	Fluxo de Ondas Curtas na Superfície Descendente
E	Evaporação
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ET	Evapotranspiração
ET _o	Evapotranspiração de referência
ET _p	Evapotranspiração potencial
ET _r	Evapotranspiração real
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
GEOS	Goddard Earth Observing System
GERB	<i>Geostationary Earth Radiation Budget</i>
GEWEX	Global Energy and Water Cycle Experiment
GMAO	Global Modeling and Assimilation Office
HDF5	<i>Hierarchical Data Format</i>

HRV	Visível Alta Resolução
HS	Hargreaves e Samani
IAF	Índice de Área Foliar
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IM	Imputação Múltipla
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IR	Infravermelho
IU	Imputação Única
Kc	Coeficiente da cultura
K _{RS}	Coeficiente de ajuste
LSA-SAF	<i>Land Surface Analysis-Satellite Application Facilities</i>
MICE	Multivariate Imputation by Chained Equations
MSAV	Índice de Vegetação Ajustada do Solo Modificado
MSG	Meteosat de Segunda Geração
n	Insolação
NASA	Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço
NEB	Nordeste Brasileiro
NEMUS	Gestão e Requalificação Ambiental Ltda
P	Pressão Atmosférica
PM	Penman-Monteith
PMM	Predictive Mean Matching
POWER	Prediction of the Worldwide Energy Resources
Prec	Precipitação
PT	Priestley e Taylor
r	coeficiente de correlação
REQM	Raiz do Erro Quadrático Médio
Rs	Radiação Solar Global
S	Desvio Padrão
S ²	Variância
SEVIRI	<i>Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager</i>
SM	Sistemas de Mesoescala
SR	Sensoriamento Remoto
SRB	Surface Radiation Budget

SVAT	Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer
T	Transpiração das Plantas
Tdew	Temperatura do Ponto de Orvalho
TESSEL	<i>Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchanges over Land</i>
Tmax	Temperatura Máxima
Tmin	Temperatura Mínima
U ₂	Velocidade do vento
UR	Umidade Relativa
UR	Umidade do ar
VCAS	Vórtices Ciclônicos de Ar Superior
VCMN	Vórtices Ciclônicos de Médios Níveis
VIS	Visível
WCRP	NASA's World Climate Research Programme
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Objetivos	21
1.1.1 Geral.....	21
1.1.2 Específicos	21
2 REVISÃO DE LITERATURA	22
2.1 Evaporação e métodos de estimativa	22
2.1.1 Breve relato sobre os métodos de estimativa da evaporação	23
2.1.2 Evaporação pelo Método Penman (1948).....	25
2.2 Evapotranspiração de referência (ET _o) e elementos meteorológicos	26
2.2.1 Principais elementos meteorológicos que determinam a ET _o	29
2.2.2 Método de Penman-Monteith modelo FAO	32
2.3 Produto ETr obtido por meio de Sensoriamento Remoto (SR).....	33
2.3.1 O MSG/SEVIRI (EUMETSAT) e o produto ET (LSA-SAF)	35
2.4 Breve caracterização física e social da Bacia Hidrográfica do São Francisco	37
2.5 Elementos e sistemas meteorológicos atuantes na BHSF	38
2.6 Estudos relacionados à Evaporação e Evapotranspiração na BHSF	42
3 MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1 Caracterização geográfica e climática da área de estudo	44
3.2 Fluxograma Metodológico	46
3.3 Dados de estações de superfície	47
3.4 Tratamento dos dados das estações de superfície	49
3.4.1 Preenchimento de falhas utilizando Imputação Múltipla (IM)	49
3.5 Teste de consistência.....	56
3.6 Estimativa de dados faltosos das estações da Agritempo/Embrapa	57
3.6.1 Umidade Relativa	58
3.6.2 Velocidade do Vento	58

3.6.3 Radiação Solar	58
3.7 Ajuste dos dados de superfície para velocidade do vento.....	59
3.8 Dados orbitais obtidos do LSA-SAF	60
3.8.1 Nome do Arquivo ET (DMET).....	61
3.8.2 Descrição geral do algoritmo do produto ET	62
3.8.3 Dados orbitais de entrada para o produto ET.....	64
3.8.4 Produto diário (ET - DMET).....	66
3.8.5 Organização e conversão dos dados orbitais LSA SAF	66
3.9 Estimativa de Evaporação e Evapotranspiração com dados de superfície	67
3.9.1 Estimativa da Evaporação pelo Método de Penman (1948).....	67
3.9.2 Estimativa da Evapotranspiração pelo método de Peman-Monteith (FAO).....	68
3.10 Estatística descritiva dos dados de superfície	72
3.11 Análise dos dados de evaporação e evapotranspiração	73
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	74
4.1 Preenchimento de falhas com método PMM (Predictive Mean Matching) e validação dos dados.....	74
4.2 Análise das principais variáveis meteorológicas utilizadas no estudo	77
4.3 Análise da Evaporação (E) pelo método de Penman (1948).....	81
4.3.1 Análise diária e mensal da Evaporação (E).....	81
4.4 Análise da Evapotranspiração de referência (ETo) e real (ETr)	89
4.4.1 Evapotranspiração de referência (ETo): método de Penman Monteith (FAO) .	89
4.4.2 Evapotranspiração real (ETr) por meio de sensoriamento remoto	96
4.4.2.1 Análise diária e mensal da Evapotranspiração real (ETr) LSA SAF.....	96
4.5 Análise comparativa dos resultados anuais de Evaporação, Evapotranspiração e Precipitação no Baixo São Francisco	102

5 CONCLUSÕES	107
REFERÊNCIAS	108
APÊNDICE A – Quadro de preditores.....	117
APÊNDICE B – Quadro Caracterização BHSF	118

1 INTRODUÇÃO

A população de mais de 30 países de regiões áridas e semiáridas deverão sofrer por conta da escassez hídrica severa por volta de 2025, significando uma disponibilidade anual de apenas 1000 m³ per capita, com sérias ameaças ao abastecimento humano e agravamento da pobreza rural (SMITH, 2000). Essa condição de escassez hídrica está relacionada a elevadas taxas de evaporação e padrões de precipitação baixos e mal distribuídos no espaço e no tempo. Segundo Benzaghta et al. (2011), essa perda hídrica depende principalmente do clima, resultando no agravamento da escassez de água e limitação do desenvolvimento socioeconômico nessas regiões.

O polígono das secas, que de acordo com Marengo (2008) ocupa 62% da área do Nordeste Brasileiro (NEB), apresenta altos índices de evapotranspiração que acentua os déficits hídricos durante o período de ausência de chuva, bem como tem altas taxas evaporativas em função da intensidade da radiação solar, temperaturas altas, provocando processos de desertificação e ocasionando prejuízos econômicos (MARENGO et al., 2016).

Considerando as nuances das variáveis que influenciam nessas taxas evaporativas, um grande número de métodos tem sido proposto, como alternativa para estimativa da evaporação, usando-se equações determinísticas, originárias de modelos meteorológicos. O método combinado (termos energético e aerodinâmico) de Penman (1948) é um dos mais utilizados para estimar a denominada “evaporação potencial”, definida como aquela que ocorre numa superfície extensa de água livremente exposta às condições atmosféricas (OLIVEIRA, 2009).

A taxa de evapotranspiração também tem grande influência na perda de água em bacias hidrográficas, domina o equilíbrio hídrico e exerce influência sobre os processos hidrológicos, como a dinâmica da umidade do solo, recarga de água subterrânea e escoamento superficial. Portanto, o entendimento das variações da evapotranspiração é de grande relevância nos estudos hidrológicos regionais. A estimativa da evapotranspiração e a quantificação de sua tendência se mostra como valiosos dados de referência para estudos regionais de modelagem hidrológica, planejamento de irrigação e gerenciamento de recursos hídricos (SILVA, 2017 **apud** LIANG et al., 2009).

No que se refere aos vários métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, na escala diária, a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (Food and Agriculture Organization – FAO) adotou o de Penman-Monteith como padrão, segundo Smith (1991), embora seu uso exija informações meteorológicas nem sempre disponíveis. De acordo com Sentelhas (1998), apesar das estações meteorológicas automáticas fornecerem dados com melhor caracterização das variáveis, em razão da aquisição contínua dos dados, elas nem sempre são disponíveis, havendo necessidade de utilização de dados meteorológicos provenientes de estações convencionais com menor representatividade, bem como na ausência de grandes volumes de dados, utilizar-se de métodos de imputação múltipla, obtendo resultados mais rápidos e com valores confiáveis.

Uma outra situação é a necessidade de estimativa e avaliação de dados climáticos em maiores escalas. A utilização de satélites geoestacionários para o acompanhamento de fenômenos meteorológicos, nos últimos anos, tornou-se essencial, uma vez que esses possuem um tempo de revisita menor que outros tipos de plataformas orbitais, a exemplo dos satélites para recursos terrestres (CONCEIÇÃO, 2013).

Logo, a região de importância nesse estudo é o Baixo São Francisco (BSF), com uma área total de 25.404 km², estende-se desde o trecho à jusante de Xingó até a foz no oceano Atlântico e tem uma população residente de quase um milhão e meio de habitantes, composta por uma alta densidade demográfica (56,6 hab/km²) em relação às demais regiões da bacia, perdendo apenas para o Alto São Francisco (71,5 hab/km²). Com relação ao uso do solo, as pastagens lideram na região do BSF, havendo uma significativa complementaridade de outros usos como lavouras e sistemas agroflorestais, sendo as matas e/ou florestas, as menos expressivas. Seu bioma original é composto por Caatinga e Mata Atlântica, ocupando de acordo com dados do IBAMA (2010) 5,62% e 1,47% do total da bacia (NEMUS, 2015, V1).

Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA, 2015), o BSF é caracterizado por apresentar períodos críticos de prolongadas estiagens, resultado de baixa pluviosidade e alta evapotranspiração. O mesmo integra grande parte de sua área na zona semiárida, fazendo com que o Rio São Francisco desempenhe um importante papel nesta região. Vale a pena destacar que, a Usina de Xingó

localizada no BSF, em termos de potencial hidrelétrico outorgado (3.162 MW), representa atualmente uma das bases de suprimento de energia da região nordeste.

Neste cenário, ainda existem poucos estudos sobre evaporação e evapotranspiração na região do BSF, havendo poucas estações meteorológicas no seu entorno, o que reforça a importância de mais pesquisas voltadas para o gerenciamento dos recursos hídricos nessa região tão marcada pela seca e desigualdades sociais.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

ESTIMAR a evaporação e evapotranspiração no Baixo São Francisco com uso de modelo FAO e sensoriamento remoto.

1.1.2 Específicos

VALIDAR o método estatístico média preditiva (Predictive Mean Matching-PMM) do pacote (MICE) utilizado no preenchimento de falhas com dados das estações meteorológicas de superfície;

ANALISAR o comportamento temporal e espacial das variáveis meteorológicas de precipitação pluviométrica, radiação solar global, temperatura média, umidade relativa do ar e velocidade do vento, comparando-as com resultados por localidades no Baixo São Francisco;

ESTIMAR a evaporação pelo método Penman (1948), evapotranspiração de referência (FAO) e real (produto LSA-SAF), analisando sua dinâmica diária, mensal e interanual;

COMPARAR os resultados das estimativas de evaporação e evapotranspiração de referência e real, com dados de precipitação do período de estudo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Evaporação e métodos de estimativa

O ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre (TUCCI, 2012). Segundo Oliveira (2009) a transferência da água da superfície terrestre para a atmosfera, que se dar do estado líquido para o estado gasoso, processa-se através da evaporação direta, por transpiração das plantas e dos animais e, em menor escala, por sublimação. Durante esse processo de alteração do seu estado físico, a água, absorve calor, armazenando energia solar na molécula de vapor.

No que se refere ao controle da energia solar no processo de evaporação, a água evapora, em particular, durante os períodos mais quentes do dia e nas zonas mais quentes da Terra, principalmente nas regiões áridas e semiáridas. No entanto, a rapidez com que a água evapora (taxa de evaporação) depende de vários fatores, além da disponibilidade de energia radiante, tais como: área da superfície evaporante, temperatura, pressão atmosférica, umidade do ar e vento. (OLIVERIA, 2009).

O entendimento do fenômeno da evaporação está ligado tanto ao estudo hidrológico como meteorológico. Assim, para o entendimento desse processo físico é necessário o conhecimento das variáveis que definem o clima e das variáveis associadas à movimentação da água na terra representada pelo ciclo hidrológico. A carência de dados para estudos dessa natureza dificulta esse processo (FONTES, 2005).

Para a análise da ocorrência da evaporação é necessário entender o balanço de radiação de uma determinada superfície para fazer a estimativa da radiação líquida, ou seja, a radiação efetivamente absorvida por uma superfície. Entende-se por balanço de radiação a contabilização de toda a energia radiante recebida e perdida pela superfície (FONTES et al., 2004).

Uma vez que a evaporação envolve transporte simultâneo de massa e energia, sua estimativa pode ser realizada a partir de dois procedimentos amplamente conhecidos e tem como princípio a estimativa da evaporação a partir de dados climatológicos. O primeiro é conhecido como método de transferência de massa, que determina a relação do fenômeno estudado com a pressão de vapor. O

segundo é o método do balanço de energia, que considera as entradas de energia solar e térmica e as saídas de fluxo de calor por condução, por evaporação e radiação (FONTES; ALVARES; MEDEIROS, 2004).

De acordo com Allen et al (1998) a energia é necessária para alterar o estado das moléculas de água de líquido para vapor. A força motriz para remover o vapor de água da superfície de evaporação é a diferença entre a pressão do vapor de água na superfície de evaporação e a do ambiente atmosférico. À medida que a evaporação avança, o ar circundante torna-se gradualmente saturado e o processo diminuirá e poderá parar se o ar úmido não for transferido para a atmosfera. A substituição do ar saturado por ar mais seco depende muito da velocidade do vento. Consequentemente, radiação solar, temperatura do ar, umidade do ar e velocidade do vento são parâmetros climatológicos a considerar ao avaliar o processo de evaporação.

A evaporação recebe, também, influência da superfície evaporante, por meio da temperatura da camada superior, do albedo e da rugosidade. Entende-se por albedo a parcela da radiação solar refletida pela superfície, que, para a superfície de água, oscila entre 0,05 e 0,15, sendo o limite superior para água turva. Assim, quanto maior for o albedo, menor será a evaporação (MOLLE, 1989).

2.1.1 Breve relato sobre os métodos de estimativa da evaporação

A estimativa da evaporação, pode ser realizada pela utilização de modelos fundamentados no balanço de energia, nos processos de transferência de massa, balanço hídrico, métodos aerodinâmicos, métodos combinados por meio de formulações empíricas ou semi-empíricas e pelos tanques de evaporação (LEÃO et al., 2013). Segundo Reis e Dias (1998), a maioria dos métodos disponíveis estima a evaporação a partir de observações de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar ou utiliza medidas de tanques de evaporação alocados em estações meteorológicas no ambiente terrestre.

Os séculos XVII e XVIII são marcados pelas primeiras medidas e experimentos relacionados à evaporação. Descartes (século XVII) foi o primeiro filósofo natural a romper com os conceitos de Aristóteles e o primeiro experimento relatado é atribuído a Perrault em 1733 (BRUTSAERT, 1988).

De acordo com Oliveira (2009) em 1802, Dalton publicou, indiscutivelmente, a maior contribuição para o desenvolvimento da teoria atual sobre a evaporação. O

autor conseguiu resumir o consenso de alguns cientistas do final do século XVIII, explicando que alguns fluídos evaporam mais rapidamente que outros; que a quantidade evaporada é diretamente proporcional à superfície exposta; o acréscimo de temperatura no líquido é visto como acréscimo da evaporação; a evaporação é maior quando existe corrente de ar do que quando este está parado; e ainda que, a evaporação da água é maior quanto menor for a umidade existente previamente na atmosfera.

Howard Penman, em 1948, desenvolveu na Inglaterra o primeiro tratamento físico adequado com o intuito de estimar a evaporação de uma superfície de água livremente exposta à atmosfera, por meio de uma equação clássica, muito utilizada até os dias atuais (FONTES, 2005; OLIVEIRA, 2009). Em análise da compreensão física do processo, para que a evaporação ocorra é necessária uma força que promova o deslocamento das moléculas de água da superfície evaporante, e para a mudança de fase é necessária uma fonte de energia. A fonte de energia seria em função do saldo de radiação e a força para o deslocamento das moléculas é em função da diferença de pressão de vapor entre a superfície evaporante e o ar que a envolve, sendo responsáveis, respectivamente, por 75% e 25% do processo evaporativo (SOBRINHO, 1983).

Por envolver essas duas considerações teóricas, de transferência de massa e do balanço de energia radiante, a fórmula de Penman ficou enquadrada na categoria dos chamados métodos combinados (LEÃO et al., 2013). Vieira (2015) relata que a dificuldade de disponibilidade de informações climáticas para o modelo, tem se constituído em limitação à sua utilização.

As medidas de radiação requerem equipamentos relativamente caros que precisam de manutenção regular e cuidadosas recalibrações. A partir de então, surgiu à motivação de muitos autores estudarem a simplificação do modelo ou introduzirem correções para diferentes localidades. São exemplos de equações simplificadas: Kohler, Nordenson e Fox (1955), Linacre (1977, 1993) e Priestley e Taylor (1972).

O método de Penman vem sendo utilizado em vários estudos pelo mundo apresentando resultados satisfatórios, como por exemplo, Leão et al. (2013) utilizaram diferentes métodos combinados, derivados da equação de Penman, concluindo que todos os modelos foram adequados para a estimativa da evaporação

no açude de Banabuiú – CE durante a estação seca, por terem apresentado ótimo desempenho em conformidade com os índices estatísticos.

Estimar a evaporação de superfícies de água livre não é uma tarefa simples, pois há um número de fatores que afetam a taxa de evaporação, nomeadamente, o clima e fisiografia da massa de água e seus arredores. Portanto, há uma necessidade crítica para avaliar cenários mais lógicos para estimar a evaporação em condições da falta de alguns dos dados medidos (MAJIDI et al., 2015).

Considerando estas questões, admite-se que toda metodologia que possa subsidiar a economia e incentivar a preservação dos recursos hídricos deve ser estabelecida, além de representar uma valiosa contribuição para diferentes campos do conhecimento científico, bem como grande importância nas aplicações meteorológicas e hidrológicas (OLIVEIRA. 2009).

2.1.2 Evaporação pelo Método Penman (1948)

O primeiro tratamento físico adequado, na tentativa de estimar a evaporação em superfícies naturais, foi realizado por Howard Penman, em 1948, na Inglaterra. Ele desenvolveu uma equação clássica, muito usada nos dias atuais, que descreve a evaporação de uma superfície de água livremente exposta à atmosfera (FONTES, 2005).

Ainda segundo Fontes (2005), essa abordagem pertence à categoria dos chamados métodos combinados, que envolvem considerações teóricas decorrentes dos métodos de transferência de massa e do balanço de energia radiante. A equação original de Penman fornece apenas a estimativa de evaporação da água livremente exposta. Em virtude disso, a evapotranspiração em uma superfície vegetada torna-se um pouco diferente. A variação nos resultados ocorre principalmente em função da altura da vegetação, do clima e principalmente do efeito oásis na área. Abaixo, segue a Equação 1 do modelo:

$$E = \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) E_s + \left(\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right) E_a \quad (1)$$

Em que,

E = evaporação em uma superfície de água livremente exposta, (mm.d⁻¹);

γ = coeficiente psicrométrico, (kPa.°C⁻¹);

Δ = declividade da curva de pressão de saturação de vapor, (kPa.°C⁻¹);

E_s = componente de evaporação devido ao ciclo do aquecimento, (mm.d⁻¹);

E_a = componente de evaporação devido ao vento (mm.d⁻¹).

O método Penman considera o termo energético responsável por cerca de 80% do processo, cabendo o restante para o termo aerodinâmico (relativo à transferência de massa) (DIAS, 1986). Para regiões áridas o processo de advecção pode superar a importância da energia radiativa, o que tem como consequência a forte dependência do processo da evaporação com as condições das áreas vizinhas (MOLLE, 1989).

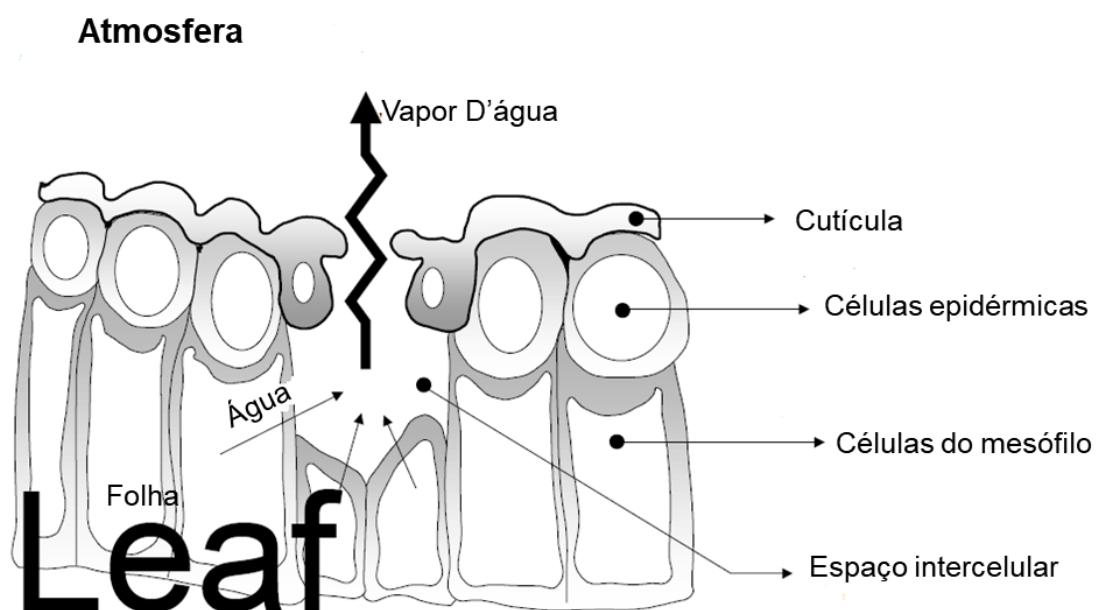
Segundo Fontes (2005), o método de Penman vem sendo utilizado em vários estudos pelo mundo e apresentando resultados satisfatórios, a exemplo da estimativa de evaporação média mensal em quatro lagos da Austrália em diferentes regiões climáticas inclusive o semiárido, apresentado por Vardavas e Fountoulakis (1996). Entretanto, deve-se salientar que a preocupação na obtenção de dados observados deve ser constante, já que essa metodologia apesar de ser a mais recomendada para essas regiões pode não se adequar a determinados lugares e, portanto, investigar e comparar os resultados com outros trabalhos (FONTES, 2005).

2.2 Evapotranspiração de referência (ET_o) e elementos meteorológicos

A combinação de dois processos separados pelos quais a água é perdida por um lado, da superfície do solo por evaporação e por outro lado, da cultura pela transpiração, é referido como evapotranspiração (ET) (ALLEN et al., 1998).

Segundo Allen et al. (1998), a transpiração consiste na vaporização da água líquida contida nos tecidos vegetais e remoção de vapor para a atmosfera. As culturas perdem predominantemente a sua água através dos estômatos. Estas são pequenas aberturas na folha da planta através das quais passam gases e vapor de água (Figura 01). A vaporização ocorre dentro da folha, nomeadamente nos espaços intercelulares e, a troca de vapor com a atmosfera é controlada pela abertura estomática. Por pouco toda a água absorvida é perdida pela transpiração e apenas uma pequena fração é usada dentro da planta.

Figura 01 – Representação esquemática de um estômato



Fonte: Adaptado de ALLEN et al., (1998).

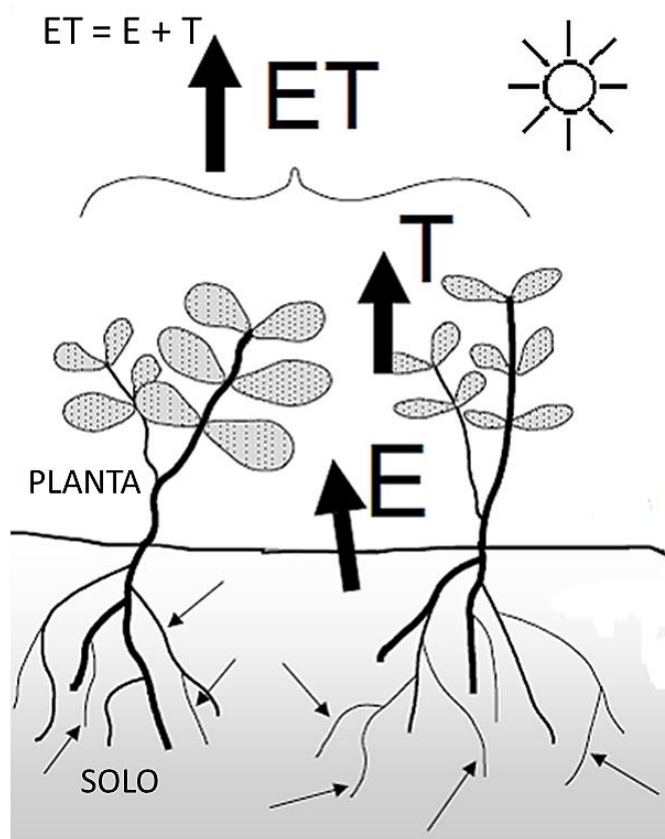
A evaporação e transpiração ocorrem simultaneamente e não é fácil distinguir os dois processos. Além da disponibilidade de água no solo, a evaporação de um solo cultivado é determinada principalmente pela fração da radiação solar que atinge a superfície do solo. Esta fração diminui durante o período de crescimento à medida que a cultura se desenvolve. (ALLEN et al., 1998).

O termo “Evapotranspiração” (ET) foi introduzido por Thornthwaite e Wilm (1944) para representar os processos conjuntos de evaporação da água dos solos (E) e de transpiração das plantas (T) que ocorrem naturalmente numa superfície vegetada, de acordo com a Figura 02, e, ao final da década de 1940 apareceu o conceito de Evapotranspiração potencial (ETp) por meio dos trabalhos científicos de Thornthwaite e Penman (1948) (ALLEN et al., 1998).

Neste contexto, em 1990, a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO, sigla do inglês Food and Agriculture Organization) promoveu, na Europa, um encontro de especialistas na área, para atender a vários objetivos dentre eles: analisar conceitos e procedimentos de metodologias de cálculos da ET (PEREIRA et al., 1997). Foi definido, então, que o termo (ETo) substituiria, de fato, o de (ETp) e o método recomendado para a sua estimativa foi o desenvolvido por Penman-Monteith, que após parametrização feito pela FAO-56,

passou a se denominar Penman-Monteith FAO-56 (PM-FAO), o qual foi bastante aceito internacionalmente por descrever com boa precisão o comportamento da ETo em diversos tipos de local e clima (ALLEN et al., 1998).

Figura 02 – Processo de Evapotranspiração (ET)



Fonte: Adaptado de ALLEN et al., (1998).

O conceito de evapotranspiração de referência foi introduzido para estudar a demanda evaporativa da atmosfera independentemente do tipo de cultura, desenvolvimento da cultura e práticas de gerenciamento. Como a água é abundantemente disponível na superfície evapotranspirante de referência, os fatores do solo não afetam a ET. Os únicos fatores que afetam a ETo são os parâmetros climáticos. Conseqüentemente, a ETo é um parâmetro do clima e pode ser calculado a partir de dados meteorológicos. A ETo expressa o poder de evaporação da atmosfera em um local específico ou determinada época do ano e não considera características da cultura ou fatores do solo (ALLEN et al., 1998).

Logo, a evapotranspiração de referência (ETo) deve ter como superfície de referência, uma cultura hipotética de gramíneas com uma suposta altura de cultura

de 0,12 m, uma resistência de superfície para uma cultura de referência $\approx 70 \text{ s.m}^{-1}$, ou seja, a resistência da cultura ao transporte de vapor d'água e um albedo de 0.23, refletindo assim 23%. A superfície de referência se assemelha a uma superfície verde extensa de grama bem irrigada de altura uniforme, crescendo ativamente e sombreando completamente o solo (ALLEN et al., 1998).

De acordo com Carvalho et al. (2011), a ETo é um elemento indicativo de demanda hídrica das culturas de um determinado local e período. Com relação à determinação da evapotranspiração em condições de campo não é uma tarefa fácil, pois depende de métodos não muito práticos do ponto de vista do manejo da irrigação e práticas operacionais (SILVA, S. S., 2017). Logo, a evapotranspiração de referência (ETo) pode ser obtida diretamente, por meio de lisímetros ou via balanço hídrico direto da água no solo e estimada por modelos empíricos que utilizam dados meteorológicos.

No caso dos lisímetros, quando instalados e operados corretamente, são equipamentos de medição da evapotranspiração considerados de grande precisão (BERNARDO et al., 2006). Além de não muito práticos, os métodos diretos demandam altos custos, tanto para instalação quanto manutenção, o que os tornam muitas vezes inviáveis, limitando-os a usos acadêmicos, principalmente para ajustes de métodos indiretos e pesquisas para a determinação da evapotranspiração potencial da cultura (MENDONÇA et al., 2003).

Quanto aos métodos indiretos, várias formas de equações de evapotranspiração têm sido desenvolvidas e testadas, desde modelos que utilizam como dado de entrada apenas a temperatura do ar, a exemplo do método de Hargreaves-Samani (1985) e Thornthwaite (1948), até modelos que necessitam de dados mais completos, como o modelo de Penman-Monteith (BERNARDO et al., 2006).

2.2.1 Principais elementos meteorológicos que determinam a ETo

Os elementos meteorológicos que determinam a Evapotranspiração de referência (ETo) são parâmetros climáticos que fornecem energia para a vaporização e removem o vapor de água da superfície de evaporação. Os principais elementos meteorológicos são descritos abaixo:

2.2.1.1 Radiação solar

A radiação solar tem comprimento de onda curto, sendo que parte da energia é absorvida pela atmosfera devido às moléculas de gases e partículas de poeiras nela presentes, parte é dispersa em direção ao espaço e parte em direção a Terra (TUCCI e BELTRAME, 2000). Segundo os autores, com relação à radiação que atinge a Terra, uma parcela da energia é refletida, configurando o albedo planetário, e o restante chega à superfície da Terra, atravessando as nuvens ou diretamente.

Com relação a parcela que atinge a superfície, uma parte é refletida e outra é absorvida, esta última irá produzir o aquecimento na superfície, provocando a evaporação e a radiação térmica em direção à atmosfera. Esta radiação térmica tem comprimento de onda longo e é absorvida, em grande parte, pelos gases existentes na atmosfera, o que gera o aquecimento da atmosfera e a radiação volta para Terra (TUCCI e BELTRAME, 2000).

A quantificação da radiação solar que atinge a superfície terrestre possui extrema importância para as diversas atividades, envolvendo o aproveitamento dos recursos naturais, já que é a principal fonte de energia nos processos físicos, químicos e biológicos. Interfere também nos processos de evaporação, evapotranspiração e nos estados de temperatura e umidade relativa (TEIXEIRA et al., 2004).

No que se refere ao processo de evapotranspiração, o mesmo é determinado pela quantidade de energia disponível para vaporizar a água. A radiação solar é a maior fonte de energia e é capaz de alterar grandes quantidades de água líquida em vapor de água. A quantidade potencial de radiação que pode atingir a superfície de evaporação é determinada pela sua localização e época do ano. Devido a diferenças na posição do sol, a radiação potencial difere em várias latitudes e em diferentes estações do ano (ALLEN et al., 1998).

Segundo Allen et al. (1998), a partir da associação das equações de Angström-Prescott, para o balanço de ondas curtas (BOC) e de Brunt, para o balanço de ondas longas (BOL), pode-se realizar a estimativa do saldo de radiação em superfícies planas. Esse procedimento é recomendado pela FAO, quando o objetivo é estimar a ETo pela metodologia descrita por Penman-Monteith a partir de dados de estações meteorológicas convencionais.

2.2.1.2 Temperatura do ar

A radiação solar absorvida pela atmosfera e o calor emitido pela terra aumentam a temperatura do ar. O calor sensível do ar circundante transfere energia para a cultura e exerce como tal influência controladora na taxa de evapotranspiração. Nos dias de tempo ensolarado e quente a perda de água por evapotranspiração é maior do que em dias de tempo nublado e frio (ALLEN et al., 1998). A temperatura também interfere na atividade fotossintética das plantas, já que a diferença de temperatura influencia em reações bioquímicas, cujos catalisadores, as enzimas, são dependentes da temperatura ideal para expressar sua atividade máxima (PINHEIRO, 2017).

A temperatura do ar possui grande importância na determinação da ETo, pela razão de ser um dos elementos climáticos com maior disponibilidade nas estações meteorológicas convencionais e automáticas. A partir desse fato, com falta de dados de radiação, a temperatura do ar pode ser utilizada como indicativo de energia no sistema analisado (MEDEIROS, 2002).

Segundo Allen et al. (1998), a maior ou menor incidência de radiação solar global devido a variação do fator latitude é determinante na variação de temperatura do ar, portanto, à medida que aumenta a latitude, a temperatura média do ar diminui. Tubelis e Nascimento (1980) explicam que a altitude é outro fator que altera inversamente o valor da temperatura do ar.

2.2.1.3 Umidade do ar

Enquanto a disponibilidade de energia do sol e do ar circundante é a principal força motriz para a vaporização da água, a diferença entre a pressão do vapor de água na superfície evapotranspirante e o ar circundante é fator determinante para a remoção deste vapor de água (ALLEN et al., 1998).

Segundo Allen et al. (1998), campos bem regados em regiões áridas quentes e secas, consomem grandes quantidades de água devido à abundância de energia e o poder evaporativo da atmosfera. Em regiões tropicais úmidas, apesar da entrada de alta energia, a alta umidade do ar reduzirá a demanda de evapotranspiração. Em tal ambiente, o ar já está perto da saturação e, portanto, a taxa de evapotranspiração é menor do que em regiões áridas.

O teor de água do ar pode ser expresso de várias maneiras. Em agrometeorologia, a pressão de vapor, temperatura do ponto de orvalho e umidade

relativa são expressões comuns para indicar a umidade (ALLEN et al., 1998). A umidade atmosférica é a fonte das precipitações e a controladora das taxas de evaporação do solo e reservatórios, como também da transpiração dos vegetais (FONTES, 2005).

2.2.1.4 Velocidade do vento

O movimento do ar sobre a superfície de uma folha remove o vapor d'água e, assim, aumenta o gradiente de potencial de água, provocando a transpiração no vegetal. Porém, quando ocorrem grandes velocidades do vento, a transpiração pode diminuir, uma vez que muito vento pode induzir o fechamento estomático, seja por distúrbios mecânicos como resultados da agitação da folha ou pelo aumento do déficit de água que controla a síntese do ácido abscísico, que é um hormônio vegetal sintetizado principalmente nas folhas e atuando no fechamento dos estômatos quando falta água às plantas (SUTCLIFFE, 1980).

O processo de remoção de vapor depende, em grande parte, da velocidade do vento e da turbulência do ar que transfere grandes quantidades de ar sobre a superfície evaporante. Quando vaporizada a água, o ar acima da superfície de evaporação torna-se gradualmente saturado com vapor de água. Se esse ar não é substituído continuamente com o ar mais seco, a força motriz para a remoção do vapor de água diminui a taxa de evapotranspiração (ALLEN et al., 1998).

De acordo com Allen et al. (1998), a demanda de evapotranspiração é alta em tempos mais secos, devido à baixa umidade do ar e à quantidade de energia disponível, como energia solar direta e calor latente. Sob estas circunstâncias, muito vapor de água pode ser armazenado no ar. Por outro lado, sob condições climáticas úmidas, a alta umidade do ar e a presença de nuvens fazem com que a taxa de evapotranspiração seja menor.

De acordo com Sentelhas (1998) podemos resumir que para certa região, quanto maior for a disponibilidade de energia solar, temperatura do ar e velocidade do vento, e quanto menor for a umidade relativa, maior deverá ser a taxa de evapotranspiração de referência.

2.2.2 Método de Penman-Monteith modelo FAO

De acordo com Grismer et al. (2002) existem cerca de cinquenta métodos para a estimativa da ETo, os quais exigem informações meteorológicas distintas e,

portanto, produzem frequentemente, resultados inconsistentes. A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (Food and Agriculture Organization–FAO) estabeleceu no ano de 1990 o método de Penman-Monteith como a estimativa padrão da ETo.

O método da FAO é recomendado como o único método para determinar a ETo. O método é fisicamente baseado nos parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos. (ALLEN et al., 1998). Caso não haja disponibilidade de algum parâmetro requerido na entrada de dados da equação FAO Penman-Monteith, pode-se usar a metodologia proposta por Allen et al. (1998) para subsidiar a falta de dados de radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento. Quando ocorre a falta de dados de temperatura, não é possível a utilização do método padrão FAO Penman-Monteith. Diversas metodologias foram propostas para o requerimento apenas de temperatura para o cálculo da ETo (PINHEIRO, 2017).

Diversos trabalhos confirmam que o desempenho desse método é satisfatório, quando comparado com medidas em lisímetros: Jensen et al. (1990), Allen et al. (1994) em outros países, e Camargo e Sentelhas (1997), Pereira (1998), Santiago (2001) e Medeiros (2002) no Brasil. Porém, isso não significa que seja operacionalmente perfeito, mas que é baseado em princípios físicos corretos (CABRAL, 2014 apud SEDIYAMA, 1996).

Segundo Chin e Zhao (1995) há consenso entre os hidrologistas que o método de Penman-Monteith-FAO fornece a melhor descrição dos processos, tanto da evaporação quanto da evapotranspiração, sendo que as pesquisas sobre o modelo são divididas em três frentes principais. A primeira e mais difundida é o uso da equação Penman-Monteith (PM-FAO), para avaliação e calibração de equações empíricas; a segunda forma de uso da equação padrão é a avaliação e melhoria do seu desempenho em diversas condições climáticas; a terceira vertente de estudos sobre essa equação padrão revela o seu crescente uso em modelos matemáticos hidrológicos e hidráulicos, bem como aliada ao sensoriamento remoto (SILVA, 2015 apud FERNANDES et al., 2007).

2.3 Produto ETr obtido por meio de Sensoriamento Remoto (SR)

A evapotranspiração real (ETr) é evapotranspiração que ocorre nas condições reais, ou seja, sofre o efeito da limitação hídrica no solo bem como dos fatores

atmosféricos. Quando não há restrição hídrica, E_{Tr} equivale a E_{Tp} , o que só ocorre, em condições naturais, 1 ou 2 dias após as chuvas (ALLEN et al., 1998).

O conhecimento da fração evaporativa é importante para o cálculo do valor de referência da evapotranspiração (E_{TrF}), definida como a razão entre a evapotranspiração instantânea para cada pixel (E_{th}) naquele horário e a Evapotranspiração de referência (E_{To}), proposta pela FAO e calculada a partir de dados meteorológicos como temperatura do ar, velocidade dos ventos, umidade relativa do ar, duração do fotoperíodo e pressão atmosférica (MARTINS, 2015).

De acordo com Allen et al. (2002) os valores de E_{TrF} são semelhantes ao coeficiente da cultura (K_c), variando de 0 a 1 e ocasionalmente atingindo valores de 1,1, quando a evapotranspiração instantânea for significativamente superior à evapotranspiração de referência. Em testes realizados durante a aplicação do modelo, verificou-se que não existem grandes diferenças nos resultados quando se utiliza a fração evaporativa como evapotranspiração de referência, nem quando E_{TrF} é substituída pelo coeficiente da cultura mapeada como uso da terra e cobertura vegetal. Os autores ainda destacam que podem ocorrer valores negativos de E_{TrF} ocasionados por erros em etapas anteriores do modelo, principalmente no cálculo do balanço de energia.

O estudo de ET em locais específicos ou em pequenas escalas, a maioria dos métodos propostos é com base em medições clássicas de correlação de vórtices, razão de Bowen e balanço hídrico do solo, apoiado por uma rede de estações terrestres (CHOUDHURY, 1991). Em escalas regionais e globais, o Sensoriamento Remoto (SR) via satélite permanece como o único método capaz de fornecer ampla cobertura de área a custos economicamente acessíveis (CHOUDHURY, 1991).

A maioria dos métodos propostos usa dados derivados do SR combinados em modelos com diferentes graus de complexidade. Esses modelos variam de métodos diretos empíricos a modelos determinísticos complexos baseados em módulos Transferência de Solo-Vegetação-Atmosfera SVAT (Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer) que calculam os diferentes componentes do balanço de energia (CHOUDHURY, 1991). Segundo o autor, uma grande dificuldade para o uso de SR para monitorar ET é que a mudança de fase das moléculas de água não produz nem emissão nem absorção de um sinal eletromagnético. Logo, o processo ET não é diretamente quantificável a partir de observações de satélite. Tem que ser avaliado,

aproveitando as informações obtidas através do satélite sobre as variáveis de superfície que influenciam a evapotranspiração.

Portanto, a utilização de satélites meteorológicos geoestacionários para o acompanhamento desses fenômenos torna-se essencial, uma vez que esses possuem um tempo de revisita menor que outros tipos de plataformas orbitais, a exemplo dos satélites para recursos terrestres. É justamente essa alta resolução temporal que torna os satélites meteorológicos ideais para a estimativa de parâmetros como emissividade, albedo, temperatura de superfície, fluxos de radiação, evapotranspiração, dentre outros (CONCEIÇÃO, 2013).

2.3.1 O MSG/SEVIRI (EUMETSAT) e o produto ET (LSA-SAF)

A Organização Europeia para a Exploração de Satélites Meteorológicos EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites) é uma instituição intergovernamental que foi criada em 1983 através de uma convenção internacional que envolve vinte países da Europa, entre eles Alemanha, Áustria, Bélgica, Dinamarca, Espanha, Finlândia, França, Grécia, Holanda, Irlanda, Itália, Luxemburgo, Noruega, Portugal, Suécia, Suíça, Turquia e Reino Unido. Além destes, mais sete nações do leste europeu mantêm acordos de cooperação com a organização Europeia (BARBOSA e FERNÁNDEZ, 2007).

A geração da série Meteosat, denominada MSG (Meteosat de Segunda Geração), teve início em 2002 com o lançamento do satélite MSG-1 e continuidade em 2005 e 2012 com o lançamento dos satélites MSG-2 e MSG-3, respectivamente. O último satélite da série, o MSG-4, foi lançado em 2015. Em órbita geoestacionária 36.000 km acima do equador, os satélites Meteosat - Meteosat-8, -9, -10 e -11 operam sobre a Europa, África, Oceano Índico e América do Sul (EUMETSAT, 2017).

Os satélites da segunda geração levam a bordo novos radiômetros: o sensor SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager*) ou Imageador de alta rotação no visível e infravermelho e o radiômetro geoestacionário de saldo de radiação terrestre GERB (*Geostationary Earth Radiation Budget*) (EUMETSAT, 2017). As principais características do sensor SEVIRI podem ser melhor observadas na Tabela 01.

Tabela 01 – Características espectrais dos canais do SEVIRI (VIS-Visível, IR-Infravermelho, HRV-Visível Alta Resolução (High Resolution Visible)).

Canal	Canal Espectral (μm)	Banda Espectral	Comprimento Espectral (μm)	Resolução Espacial (km)	Resolução Temporal (min)
1	VIS 0.6	Visível	0,56 – 0,71		
2	VIS 0.8	Visível	0,74 – 0,88		
3	IR 1.6	Infravermelho próximo	1,50 – 1,78		
4	IR 3.9	Infravermelho termal	3,48 – 4,36		
5	IR 6.2	Vapor d'água	5,35 – 7,15		
6	IR 7.3	Vapor d'água	6,85 – 7,85	3	15
7	IR 8.7	Infravermelho termal	8,30 – 9,10		
8	IR 9.7	Infravermelho termal	9,38 – 9,94		
9	IR 10.8	Infravermelho termal	9,80 – 11,80		
10	IR 12.0	Infravermelho termal	11,00 – 13,00		
11	IR 13.4	Infravermelho termal	12,40 – 14,40		
12	HRV	Visível-Alta Resolução	0,6 – 0,9	1	5

Fonte: Adaptado de EUMETSAT (2017)

O SEVIRI é um poderoso instrumento capaz de gerar imagens da Terra, a cada 15 minutos, em 12 canais espectrais diferentes, de visível a infravermelho, com uma distância de amostragem correspondente nominalmente a 3 km no ponto subsatélite e 1 km para canal visível de alta resolução, em uma área reduzida da Terra, aliando assim alta cobertura territorial a alta resolução temporal (EUMETSAT, 2017). A partir desses 12 canais, com comprimentos de onda que variam de 0,4 a 14,4 μm , o SEVIRI fornece uma melhor cobertura meteorológica aumentando com isso a qualidade das previsões de tempo, realizando uma observação contínua da Terra (CONCEIÇÃO, 2013).

Segundo Trigo et al. (2011) o Instituto de Meteorologia de Portugal ficou responsável por coordenar a LSA-SAF (*Land Surface Analysis-Satellite Application Facilities*), um projeto em operação desde 2005 que foi criado com o objetivo de descentralizar o processamento de produtos de satélites meteorológicos.

A abordagem para derivar a ET, produto de interesse nesse estudo, faz uso de um modelo simplificado de Transferência de Solo-Vegetação-Atmosfera SVAT (*Soil-Vegetation Atmosphere Transfer*) uma versão simplificada do SVAT do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo ECMWF (*European Centre*

for Medium-Range Weather Forecasts), TESSEL (*Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchanges over Land*), que é o esquema “tile” do ECMWF para trocas superficiais sobre a terra, forçada pelos produtos de radiação DSSF “Fluxo de Ondas Curtas na Superfície Descendente” do LSA-SAF (*Down welling Surface Short-wave Flux*), DSLF “Fluxo de Ondas Longas de Superfície Descendente” (*Down welling Surface Long-wave Flux*), AL “Produto albedo” e pela meteorologia do ECMWF para estimar evapotranspiração (TRIGO, 2011).

Os produtos LSA-SAF, estão disponíveis em base irrestrita. Os dados podem ser solicitados e baixados do site (<https://landsaf.ipma.pt/en/>), enquanto o site da EUMETSAT em (<https://www.eumetsat.int/>) fornece detalhes sobre Satélites Meteorológicos Europeus e outras Instalações de Aplicação de Satélite.

2.4 Breve caracterização física e social da Bacia Hidrográfica do São Francisco

A Bacia Hidrográfica do rio São Francisco (BHSF) é uma das bacias mais importantes do território brasileiro e está compreendida entre as latitudes 7°00' e 21°00' S e as longitudes 35°00' e 47°40' W. Tem comprimento de 2.697 km e nasce na Serra da Canastra em Minas Gerais, escoando no sentido sul-norte pela Bahia e Pernambuco, quando altera seu curso para este, chegando ao Oceano Atlântico através da divisa entre Alagoas e Sergipe. Com comprimento total da rede de drenagem da respectiva bacia hidrográfica de 121.657 km e área de drenagem de 638.883 km² (NEMUS, 2015 V2). Representando 8% do território nacional, abrange 503 municípios e sete Unidades da Federação: Bahia, Minas Gerais, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Goiás e Distrito Federal, com regiões fisiográficas da Bacia: Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco (CBHSF, 2004).

De acordo com o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (CBHSF), a população total da Bacia (12.796.082 habitantes) encontra-se distribuída de forma heterogênea nas regiões fisiográficas: o Alto São Francisco com 6.247.027 hab. (48,8%), Médio São Francisco com 3.232.189 hab. (25,3%), Submédio São Francisco com 1.944.131 hab. (15,2%) e Baixo São Francisco com 1.372.735 hab. (10,7%) (CBHSF, 2004). O Baixo São Francisco (BSF) é a região menos povoada e menor, tendo uma área de 25.524 km², representando 4% da área total. Esses dados foram atualizados, conforme (apêndice B), através de relatório da empresa “Gestão e Requalificação Ambiental Ltda.” (NEMUS), que se refere ao “Plano de Recursos Hídricos da Bacia do rio São Francisco 2016-2025”, produzido em 2015.

De acordo com NEMUS (2015, V2), as áreas urbanas mais densas localizam-se no Baixo São Francisco (cerca de 3.100 hab/km²), onde prevalecem formas mais espontâneas e orgânicas (não planejadas) de “cidade”. De um modo geral, a Bacia Hidrográfica do São Francisco é um território de baixa densidade demográfica, com apenas 22,5 pessoas por quilômetro quadrado.

Na região predominam os solos podzólicos, latossolos, hidromórficos, litossolos, areias quartzosas e podzóis, dos quais apenas os três primeiros são agricultáveis, porém existem adversidades relacionadas às condições topográficas e de drenagem. A cobertura vegetal contempla fragmentos de dois importantes biomas: a Caatinga e a Floresta Atlântica (próximo à foz). Também ocorrem formações pioneiras (mangue e vegetação litorânea) (CBHSF, 2004). No relatório NEMUS (2015, V1), quanto ao uso do solo em 2010, no Baixo São Francisco predomina o grande grupo pastagens (52,6%), havendo uma significativa complementaridade de outros usos do solo com as pastagens: pastagens com lavoura, 14,9%; pastagens com matas e florestas, 5,2%; lavouras com pastagem, 2,3%; pastagens com sistemas agroflorestais, 1,9%; matas e florestas com pastagens, 1,1%. Apenas estes cinco tipos representam, no total, 25,4% dos usos do solo da região fisiográfica. Dentro dos grandes grupos de uso do solo, as matas e/ou florestas e as lavouras são os menos expressivos (2,4% e 5,4%, respectivamente). Descrições detalhadas das regiões fisiográficas da BHSF no estão no Apêndice B.

2.5 Elementos e sistemas meteorológicos atuantes na BHSF

O Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do São Francisco (BHSF), por meio de relatório de NEMUS (2015, V1), apresenta como caracterização do clima para cada uma das regiões fisiográficas da bacia, um estudo realizado através de uma análise mensal das seguintes variáveis meteorológicas: temperatura máxima e mínima do ar, intensidade do vento, umidade relativa, insolação total diária, evaporação e precipitação. Nesse relatório, foram utilizadas medições diárias disponibilizadas pelo INMET para o período 1961-2014 consoante a disponibilidade dos dados.

Com base nos dados de NEMUS (2015, V1), a temperatura do ar (máxima e mínima) apresentam um padrão sazonal que varia consoante a região fisiográfica. As regiões mais próximas da costa (Baixo e Submédio) apresentam uma menor

diferença entre a temperatura máxima e mínima, ou seja, um clima mais ameno pela influência do oceano. Esta diferença é próxima dos 10 °C e este valor é aproximadamente constante ao longo de todo o ano. Os valores inferiores da temperatura (máximas de 27-28 °C e mínimas de 18-19 °C) ocorrem em julho e agosto e as mais elevadas entre outubro e março (máximas de 32-33 °C e mínimas de 20-21 °C).

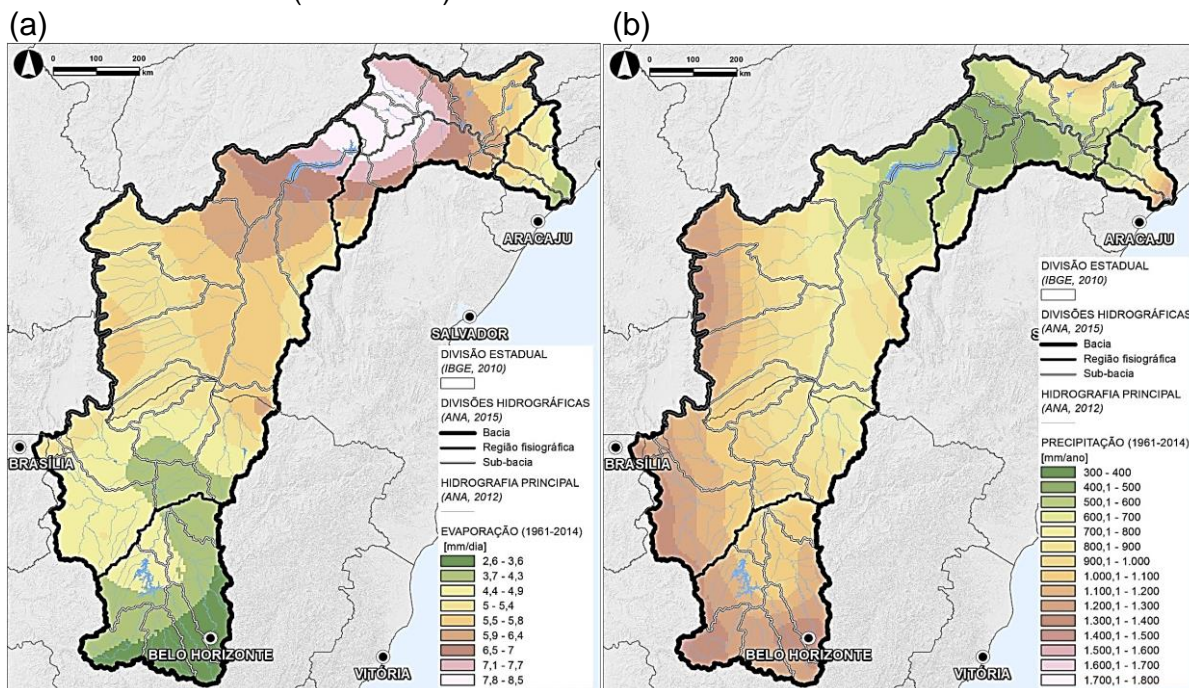
Quanto à intensidade do vento, NEMUS (2015, V2), relata que em geral, o vento na bacia do São Francisco é de intensidade média fraca. Nas regiões do Submédio e Baixo SF, a intensidade média anual do vento é superior relativamente às regiões anteriores (3,3-3,0 m/s, respectivamente) assim como a sua variação interanual. Na região do Baixo SF, região mais costeira, a intensidade do vento é mais elevada entre outubro e janeiro (intensidade do vento na ordem dos 3,6-3,8 m/s) e as intensidades mais baixas correspondem aos meses de maio a agosto (2,4 m/s). Com relação às médias mensais referentes à umidade relativa, confirma-se que o Baixo São Francisco é a região mais úmida, atingindo valores máximos nos meses de inverno (80-85%). A umidade está relacionada com a quantidade de água existente no ar. Assim sendo, espera-se que os locais mais costeiros, os mais amenos, sejam também os mais úmidos (NEMUS, 2015, V1). E, no que se refere à insolação, as regiões com mais insolação são o Alto e Médio SF, e em especial, nos meses de verão do Hemisfério Sul (máximo mensal de 280 horas, ou seja, aproximadamente 10 h/dia), contrariamente às regiões mais costeiras.

De acordo com NEMUS (2015, V1), a evaporação é maior quanto maior é a intensidade do vento e a temperatura. Com relação ao ciclo anual, os máximos de evaporação ocorrem entre agosto e outubro, para o Alto e Médio São Francisco (8,0 mm no Alto e 6,3 mm no Médio), entre setembro e dezembro no Submédio (9,0 mm), e entre novembro a fevereiro para o Baixo SF (7,0 mm). Estes máximos coincidem com os meses em que a temperatura do ar é mais elevada (meses de verão no hemisfério sul). E os mínimos para o BSF ocorrem entre maio a agosto (3,0 mm).

Sobre o padrão de evaporação na região fisiográfica da BHSF, o Alto e Submédio apresentam os maiores valores médios diários durante o ano, sendo o submédio SF, a região com os maiores valores médios diários. O Baixo SF tem valores mais ameno em relação ao submédio SF, por interferência da aproximação com o oceano Atlântico. As Figuras 03 (a e b) apresentam um panorama da

evaporação e precipitação médias na bacia do São Francisco referentes ao período de 1961-2014.

Figura 03 – Dados médios de Evaporação (mm/dia) (a) e Precipitação média (mm/ano) (b) com dados do INMET (1961-2014).



Fonte: NEMUS (2015, VI2)

Os valores médios de evaporação, de acordo com dados climatológicos do INMET (Figura 3a) para o BSF, apresentam valores entre 4,4 e 4,9 mm/dia na sub-bacia do Alto Ipanema, entre 3,7 e 5,8 mm/dia para a sub-bacia do Baixo São Francisco (AL) e entre 3,7 e 5,4 mm/dia para a sub-bacia do Baixo São Francisco (SE).

Na distribuição da precipitação por região fisiográfica, considerando o período de 1961-2014, o ciclo anual da precipitação apresenta significativa diferença entre a precipitação nas regiões Baixo e Submédio SF comparativamente com Alto e Médio SF (Figura 3b). A precipitação anual, ainda na Figura 3b, representada pelo BSF demonstra dois padrões, onde volumes de precipitação entre 700-1200 mm/ano ocorrem em regiões próximas à foz do rio e volumes de 300-600 mm/ano ocorrem na região semiárida. O fator maritimidade, nesse caso, também é um forte condicionante para esses valores.

De acordo com NEMUS (2015, V2), o Baixo e Submédio SF apresentam uma precipitação média anual pouco superior a 1,0 mm/dia (máximos de 2,5 mm/dia entre abril e junho e de 2,2 mm/dia no mês de março, para o Baixo e Submédio,

respectivamente) e uma pequena variabilidade ao longo do ano. Por outro lado, a climatologia do Alto e Médio São Francisco mostra que os meses chuvosos ocorrem de novembro a fevereiro (máximos de 7,5 e 4,5 mm/dia entre dezembro e janeiro, para os mesmos) e os meses secos correspondem aos meses de maio a setembro (0,0 mm/dia).

Os meses mais chuvosos correspondem aos meses de temperaturas mais elevadas. Logo, observando as climatologias para o Submédio e Baixo SF conclui-se que são regiões mais amenas, com uma intensidade do vento superior e menor intensidade de precipitação, comparativamente ao Alto e Médio SF. Ao longo do ano, a climatologia da precipitação mostra que os meses com precipitações mais elevadas são de janeiro a abril, para o Submédio SF, e de março a agosto, para o Baixo SF. (NEMUS, 2015, V2).

Com relação aos sistemas meteorológicos atuantes na BHSF, leva-se em consideração estudos para a região do Nordeste do Brasil, onde predominam os ventos de SE (Sudeste), E (Leste) e NE (Nordeste) (TUBELIS e NASCIMENTO, 1980), ou seja, os ventos predominam do oceano. Consoante à posição semifixa do anticiclone do Atlântico Sul, o regime de ventos predominantes no Brasil fica condicionado às atividades desse centro de ação (VAREJÃO-SILVA, 2001). Em janeiro, a região NE está sujeita a ventos alísios de NE e de SE, e aos ventos de E da convergência intertropical. Em julho, o regime dos ventos é bastante semelhante, havendo intensificação dos ventos de SE na região Nordeste. Nas regiões do Alto e Médio, é visível a influência da umidade relativa na tendência interanual da evaporação.

Quanto aos ventos, a Zona de Convergência Intertropical é uma estreita faixa de nuvens onde se encontram os ventos alísios dos hemisférios (ventos persistentes, nesta região predominantemente de Sudeste, que sopram sobre vastas regiões de um anticiclone subtropical em direção às regiões equatoriais). Influi diretamente nas chuvas da região Nordeste. Uma característica da Bacia do Rio São Francisco é a variação espacial e temporal na precipitação gerada por fatores fisiográficos, como a latitude, longitude, cobertura vegetal, proximidade ao mar e continentalidade (VIANELLO e ALVES, 1991), e por influência de vários sistemas atmosféricos associados (ARAÚJO et al., 2008).

Como mecanismos de grande escala, Molion e Bernado (2002) destacam os sistemas frontais (KOUSKY, 1979), a Zona de Convergência da América do Sul, os

bloqueios atmosféricos, os vórtices ciclônicos em Altos Níveis (KOUSKY e GAN, 1981) e a Zona de Convergência Intertropical (UVO, 1989). Relativamente aos mecanismos de mesoescala, Molion e Bernado (2002) destacam as perturbações Ondulatórias no Campo de Alísios, os complexos convectivos de mesoescala e as brisas marinha e terrestre. Quanto à microescala, indicam como os principais mecanismos, as circulações orográficas e pequenas células convectivas.

Dos sistemas atmosféricos, destaca-se a influência da Zona de Convergência da América do Sul no campo da precipitação. Esta consiste em uma banda de nebulosidade semi-estacionária, que passa pela Região Sudeste e Centro-Oeste e prolonga-se para o Oceano Atlântico, transportando chuvas que podem ser intensas (AMARO et al., 2010). Segundo Da Silva et al. (2001, 2003) o mecanismo dinâmico de precipitação tem origem na Zona de Convergência do Atlântico Sul, mas atua em períodos distintos: de novembro a março no Alto e Médio SF, e de abril a agosto no Baixo SF. Estes autores relatam ainda que a ausência da Zona de Convergência do Atlântico Sul é notável entre os meses de agosto e novembro.

Quanto aos vórtices ciclônicos em Altos Níveis que atuam na Região Nordeste do Brasil (região que engloba a área de estudo, exceto o Alto São Francisco), são de origem tropical e em geral persistentes, deslocando-se lentamente do oceano para o continente e vice-versa, e provocando céu limpo na região sul e central do Nordeste e chuvas no setor norte do Nordeste do Brasil (CALBETE et al, 1996).

2.6 Estudos relacionados à Evaporação e Evapotranspiração na BHSF

Estudos de Vieira (2015), sobre a Evaporação mensal média (mm) no reservatório de Sobradinho, no Submédio São Francisco, para o período de 1980 a 2012 e estimativa pelos modelos de Penman, Linacre, Kohler, Thornthwaite e CRLE (Relação Complementar de Evaporação em Lago) e pelo método do tanque Classe A, demonstraram resultados importantes para essa região da bacia do São Francisco. No trabalho citado, o modelo de Penman foi adotado como referência por apresentar uma base física mais realista, além de ser citado em várias literaturas como o que melhor representa a evaporação quando comparado aos métodos padrão. Os resultados apresentaram altos valores de evaporação em janeiro, decrescendo ao longo dos meses até atingir o valor mínimo no inverno, aumentando a partir daí até meados de outubro, no qual se atinge a máxima evaporação.

Em resumo, a evaporação média anual no reservatório de Sobradinho estimada pelo modelo de Penman foi de 2.108 mm e no reservatório de Três Marias foi de 1.615 mm (VIEIRA, 2015). Segundo Fontes (2005) a estimativa de evaporação líquida para as usinas em operação do Sistema Hidrelétrico Brasileiro, o lago de Sobradinho, situado na bacia do Rio São Francisco na região do município de Petrolina, apresenta a maior taxa de evaporação.

No que diz respeito à Evapotranspiração, segundo Silva, N. D. (2017), o total anual de precipitação pluviométrica e ETo na bacia do São Francisco se dar de forma desigual conforme Tabela 02. Os maiores totais anuais de chuva se concentram na parte alta da bacia (no Alto São Francisco) e região baixa da bacia (na foz do rio São Francisco). As regiões do Médio e Submédio São Francisco apresentam as menores lâminas anuais de chuva. A ETo está fortemente relacionada com a precipitação na medida em que as maiores demandas evaporativas da atmosfera ocorrem nas regiões de menor precipitação, portanto de maior aridez.

Tabela 02 – Estatística descritiva da ETo anual por região fisiográfica da bacia hidrográfica do rio São Francisco. DesvPad (Desvio Padrão).

Região Fisiográfica	ETo (mm ano ⁻¹)				
	Min	Max	Amplitude	Média	DesvPad
Alto	1.216,79	1.513,69	296,90	1.354,21	64,24
Médio	1.567,88	1.838,09	270,21	1.669,79	65,98
Submédio	1.605,50	2.114,21	506,63	1.887,72	109,05
Baixo	1.304,91	1.838,80	533,89	1.631,94	108,13

Fonte: SILVA, S. S., (2017)

Os estudos de Silva, N. D. (2017) relatam ainda que a ETo anual máxima, é quase o dobro da ETo anual mínima, sinalizando para uma grande variabilidade da ETo na bacia. A ETo anual média aproximada foi de 1.654,3 mm. A parte alta da bacia apresentou menor variação espacial, devido principalmente aos valores elevados de altitude, conforme é argumentado por Dalezios et al. (2002), em que em regiões montanhosas e de alta altitude, as taxas de evapotranspiração de referência tendem a ser estáveis.

De acordo com Barros et al (2017), sobre comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em um perímetro irrigado de Jacaré Curitiba no Baixo São Francisco, mostraram que dentre os modelos de Hargreaves

e Samani (HS) , FAO – Radiação (FAO-Rad), Blaney-Criddle (BC) e Priestley e Taylor (PT) utilizados para uma série de dados de 2006 a 2013 e baseados na estimativa da ETo, o modelo de HS apresentou os melhores resultados quando não se dispõe dos valores de Evapotranspiração de referência estimados por PM. Ainda segundo Barros et al (2017), a Evapotranspiração no perímetro irrigado Jacaré-Curituba segundo os dados do modelo de Penman-Monteith (PM) atinge uma média diária de 5,81 mm.d⁻¹. A maior média foi para o modelo FAO-Rad, com 8,75 mm.d⁻¹, e menor com o modelo BC, com 4,09 mm.d⁻¹. O modelo de PT apresentou média de 4,74 mm.d⁻¹ e a média mais próxima foi a de HS com 5,26 mm.d⁻¹. Tal pesquisa é um dos poucos estudos de evapotranspiração de referência realizados na região.

Com relação a Evapotranspiração real, estudos de Martins (2015), relata a utilização de dados do sensor MODIS do satélite AQUA para estimar valores de evapotranspiração real em superfície na bacia do Rio Paranaíba – Brasil obtiveram como resultados valores médios de 3,4 mm/dia para evapotranspiração real, sendo os maiores valores observados nos meses de novembro e dezembro e os menores no mês de outubro. Segundo o autor, corpos d'água e áreas com vegetação arbórea densa (formações florestais e silvicultura) apresentaram valores médios de evapotranspiração acima de 5 mm/dia, enquanto que em áreas urbanas e com solo sem cobertura vegetal esses valores médios não ultrapassaram 2 mm/dia.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

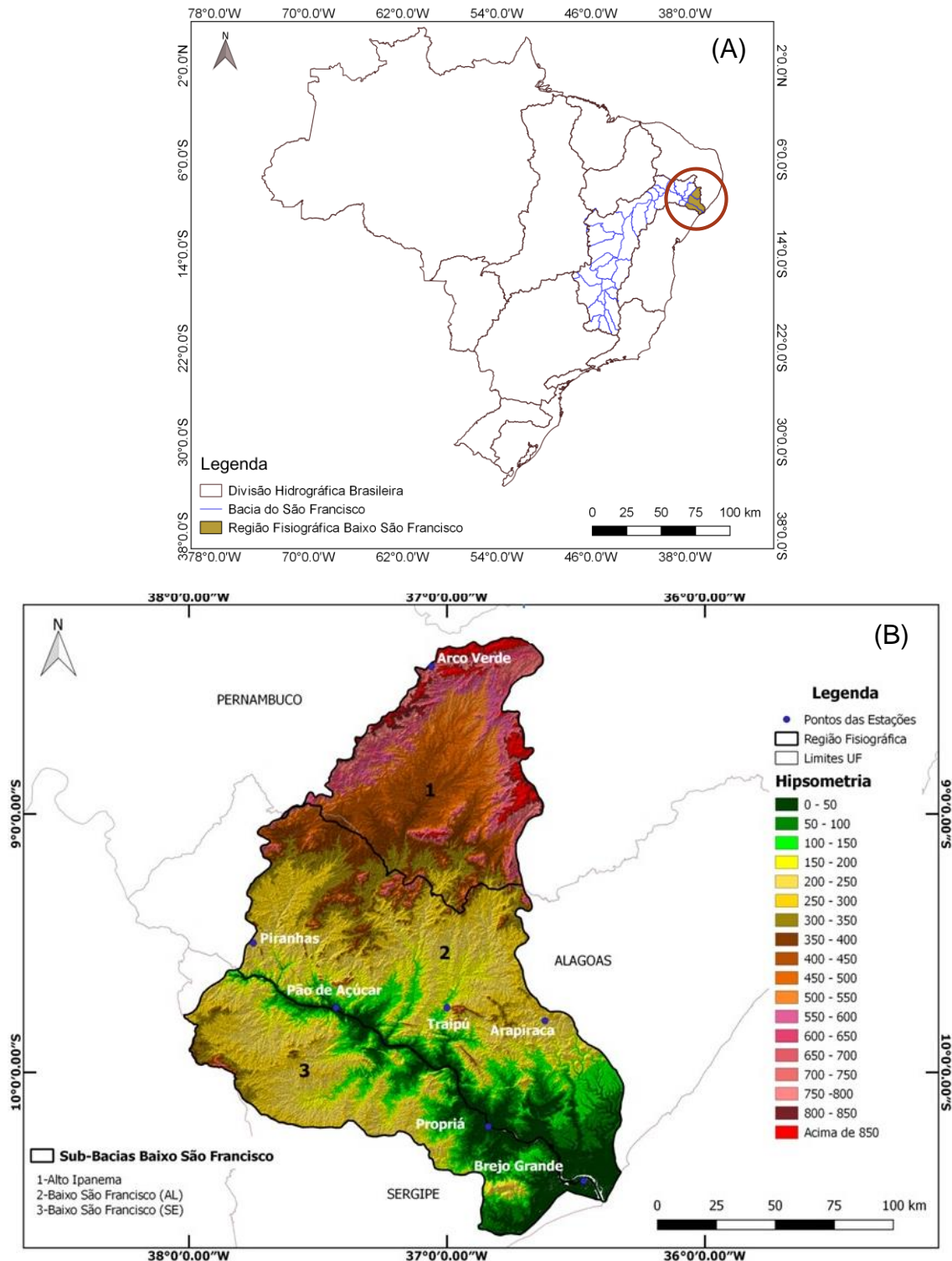
3.1 Caracterização geográfica e climática da área de estudo

O estudo foi desenvolvido para a região fisiográfica do Baixo São Francisco (BSF), Figura 04, que dispõe de uma rede de drenagem com 5.713 km e corresponde ao trecho à jusante de Xingó até a foz no oceano Atlântico, abrangendo os estados de Pernambuco, Alagoas e Sergipe. Compreende as sub-bacias dos rios Ipanema e Traipu e Marituba, na margem esquerda e Capivara, Gararu e Betume na margem direita. As principais cidades são Arapiraca e Penedo em Alagoas. As suas sub-bacias hidrográficas são Alto Rio Ipanema, Baixo Ipanema/Baixo São Francisco (AL) e Baixo São Francisco em Sergipe (SE) (NEMUS, 2015, V1 e V2).

De acordo com Bernardes (1951), a bacia apresenta diversos tipos de clima na classificação de Köppen. No BSF, o clima predominante é o AS (quente e úmido,

com chuvas de inverno). No entanto, existem zonas a noroeste com características climáticas BSh, isto é, semiárido com curta estação chuvosa no outono/inverno.

Figura 04 – Localização da área de estudo. Na figura da letra (A) está representado um mapa das bacias hidrográficas brasileiras com destaque em círculo para o Baixo São Francisco. Figura da letra (B) o mapa hipsométrico do BSF.



Fonte: Autor (2019)

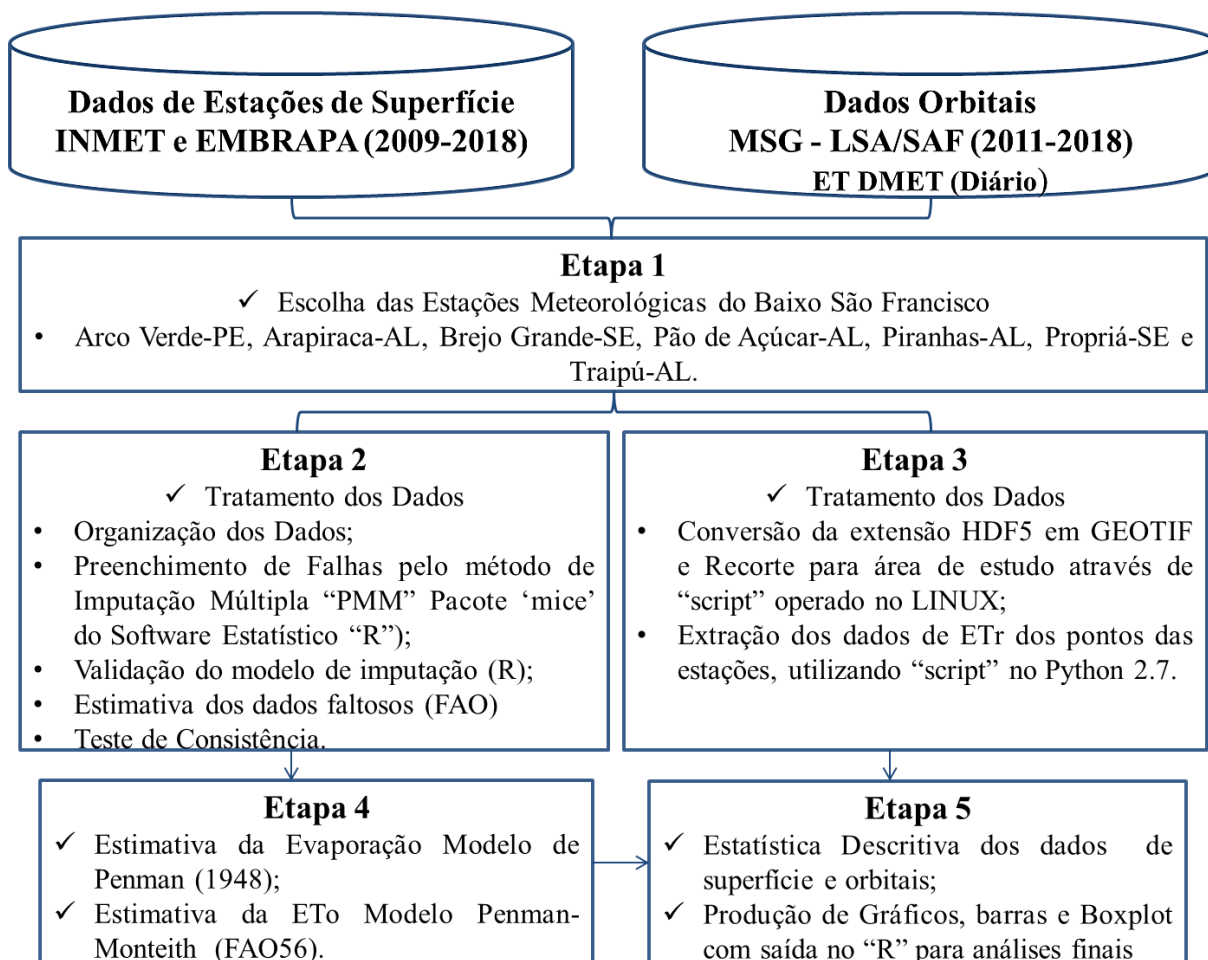
Quanto à Geomorfologia, no BSF predominam os terrenos dos Cinturões Móveis Neoproterozóicos (84% da região) que estão associados aos terrenos metamórficos e ígneos do Proterozóico e do Eoarqueano. As principais unidades de relevo no são: Depressão do Baixo Rio São Francisco (59%), Tabuleiros dos Rios Real/Vaza-Barris (17%), Planalto da Borborema (8%), Tabuleiros Costeiros (8%), Planícies Marinhas (3%), Tabuleiros de Tonã/Jatobá (2%), corpos de água (2%) (NEMUS, 2015, V2).

Na Figura 04 está representada a localização da área de estudo com representação de mapa hipsométrico. O mesmo demonstra uma variação na altitude do Baixo São Francisco. Áreas com as cores esverdeadas representam altitudes entre 0 e 150 m, áreas nas cores em tons amarelo claro, escuro e alaranjadas, as altitudes são em torno de 150 a 550m e, por fim, as áreas representadas nas cores com tons de rosa a vermelho, as altitudes variam de 550 a mais de 850 m. Segundo NEMUS (2015, V2), no Baixo S. Francisco as cotas variam entre zero e 1.150 m, sendo que as cotas superiores a 1.000 m estão sobretudo associadas ao planalto Borborema. Em destaque, 81% da região têm altitudes até 450 m. As altitudes abaixo dos 50 m ocorrem junto à foz, associadas aos tabuleiros costeiros.

3.2 Fluxograma Metodológico

Para uma melhor compreensão da metodologia utilizada no estudo, a Figura 05 está representando um fluxograma com a distribuição das etapas metodológicas divididas em cinco etapas. A etapa 1, que apresenta as localidades de estudo, demonstra que todas as demais etapas estiveram interligadas com a mesma. As etapas 2 e 3 estiveram relacionadas com o tratamento dos dados e a etapa 4 tratou das estimativas de evaporação e evapotranspiração a partir dos dados de superfície. Por fim, as estatísticas descritivas e produção dos gráficos na etapa 5 foram aplicadas para toda a base de dados.

Figura 05 – Fluxograma da metodologia adotada para estimativa da evaporação e evapotranspiração no Baixo São Francisco.



Fonte: Autor (2019)

3.3 Dados de estações de superfície

Os dados das estações meteorológicas terrestres, utilizados neste trabalho, foram obtidos através do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), no site oficial do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), no endereço eletrônico www.inmet.gov.br, bem como no site do Sistema de Monitoramento Agrometeorológico (AGRITEMPO) da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), no endereço eletrônico www.agritempo.gov.br. As sete estações meteorológicas, assim como sua localização geográfica e respectivos órgãos operadores são apresentadas na Tabela 03.

As sete estações meteorológicas, de acordo com Tabela 03, pertencem à rede nacional de observações meteorológicas de superfície, do Instituto Nacional de Meteorologia (cinco do INMET) e (duas da EMBRAPA).

Tabela 03 – Estações meteorológicas do Baixo São Francisco utilizadas no estudo pertencentes ao INMET e EMBRAPA.

Código	Estação	UF	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Data Fundação	Órgão
81953	Arco Verde	PE	-8,43	-37,05	684,0	20/11/2004	INMET
81996	Arapiraca	AL	-9,80	-36,61	241,0	27/04/2008	INMET
86618	Brejo Grande	SE	-10,41	-36,46	10,0	16/07/2008	INMET
81994	Pão de Açúcar	AL	-9,74	-37,43	19,1	14/07/2007	INMET
TRMM 5650	Piranhas	AL	-9,50	-37,75	246,0	01/03/2000	Agri tempo/ EMBRAPA
83097	Propriá	SE	-10,21	-36,84	19,9	10/05/1925	INMET
TRMM 5507	Traipú	AL	-9,75	-37,00	98,0	01/03/2000	Agri tempo/ EMBRAPA

Fonte: Autor (2019)

Para os cálculos da Evaporação e Evapotranspiração, foram utilizados dados descritos na Tabela 04, de acordo com o tipo de estação, referentes a um período de 10 anos (2009 a 2018).

Tabela 04 – Dados meteorológicos utilizados na pesquisa das respectivas estações (AUT-Automática, CONV-Convencional e AGR-Agritempo/Embrapa).

Variável	Unidade	Sigla	Estação	Período
Temperatura Máxima	°C	Tmax	AUT/CONV/AGR	2009 a 2018
Temperatura Mínima	°C	Tmin	AUT/CONV/AGR	2009 a 2018
Temperatura do Ponto de Orvalho	°C	Tdew	AUT	2009 a 2018
Umidade Relativa	%	UR	AUT/CONV	2009 a 2018
Insolação	Horas	n	CONVENC	2009 a 2018
Radiação Solar Global	MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	Rs	AUT	2009 a 2018
Pressão Atmosférica	hPa	P	AUT	2009 a 2018
Velocidade do Vento	m.s ⁻¹	U ₂	AUT/CONV	2009 a 2018
Precipitação	mm.dia	Prec	AUT/CONV	2009 a 2018

Fonte: Autor (2019)

Os dados meteorológicos obtidos nas estações do INMET e utilizados no estudo foram: Temperatura Máxima, Mínima e Ponto de Orvalho, Umidade Relativa do Ar, Radiação Solar Global, Velocidade do Vento e Precipitação (estações automáticas e convencionais) e Insolação (convencional). Os dados das Estações Automáticas estavam no formato temporal de 24 horas (UTC) e os dados da Estação Convencional se encontravam nos horários de 00, 12 e 18 horas (UTC). Os

dados da EMBRAPA (Temperatura Mínima, Máxima e Precipitação) foram obtidos com formato temporal diário. Ao final da tabulação dos dados, todos foram organizados em escala diária para posteriores cálculos.

Os dados de estações de superfície foram tabulados em planilha eletrônica do Excel 2016. Também, os mesmos dados passaram por análises de consistência. Na análise de consistência foram aplicados os critérios: a umidade relativa ar deverá estar entre zero e 100% e a diferença entre a temperatura mínima e a temperatura máxima deverá ser maior que zero.

3.4 Tratamento dos dados das estações de superfície

3.4.1 Preenchimento de falhas utilizando Imputação Múltipla (IM)

Tanto nas atividades rotineiras da meteorologia, quanto nos trabalhos específicos de pesquisa há necessidade de se ter séries completas e confiáveis de dados meteorológicos. Vários são os motivos de existências de falhas (dados errôneos ou ausentes) nas séries temporais causadas por motivos diversos, como falha nos instrumentos ou problemas nas estações meteorológicas (HARRELL, 2001). Segundo o autor, os métodos de análises estatísticas e aplicativos computacionais foram e são desenvolvidos, em sua maioria, para dados completos, mesmo uma pequena quantidade de dados com falhas pode causar problemas nas estimativas, justificando, então, a necessidade de ser considerado nas análises o problema das falhas.

Neste trabalho foi utilizada, para preenchimento de falhas em dados diários de variáveis meteorológicas, a técnica conhecida como MICE (Multivariate Imputation by Chained Equations) ou Imputação Multivariada por Equações Encadeadas. Esta é uma técnica de imputação múltipla que tem uma série de vantagens sobre outros métodos para tratar dados faltantes em séries temporais (SCHAFER e GRAHAM, 2002).

Um método de imputação pode ser classificado como simples ou única (IU), em que se realiza uma única imputação ou múltipla (IM) com várias imputações. O método de IM foi desenvolvido para solucionar a limitação do método de IU que não considera a incerteza associada à imputação (RUBIN, 1987; KENWARD e CARPENTER, 2007). A principal vantagem da (IM) em relação à (IU) é a de que ela leva em conta a variabilidade entre imputações nos resultados, tornando as estimativas mais eficientes (RUBIN, 1987).

A imputação múltipla foi proposta pela primeira vez por Rubin (1987). Segundo ele é o método de escolha para dados incompletos. Schafer (2002) classificou IM de Rubin como uma abordagem preditiva para manipulação de dados em falta, numa análise multivariada que combina técnicas estatísticas clássicas e Bayesianas. A ideia de IM é imputar um valor ausente várias vezes e, portanto, gerar vários conjuntos de dados (m). Segundo Rubin (2004), sobre os dados ausentes, boas inferências poderiam ser feitas para apenas 3 a 5 conjuntos de dados imputados. Outros sugeriram que o número de conjuntos de dados imputados deve aproximar a porcentagem de indivíduos com alguma falta de dado (BODNER, 2008).

No presente estudo, 50 conjuntos de dados ($m=50$) imputados foram usados porque havia uma taxa de falta de um pouco mais de 40%. Então, esses conjuntos de dados imputados são analisados por procedimentos padrão que são comumente usados na análise de conjuntos de dados completos. Segundo Harrell (2001) é possível definir, em linhas gerais, a escolha dos métodos de imputação de acordo com a proporção de dados faltantes em qualquer uma das variáveis:

a) Proporção $\leq 0,05$ → Neste caso pode ser usada a imputação única ou analisar somente os dados completos.

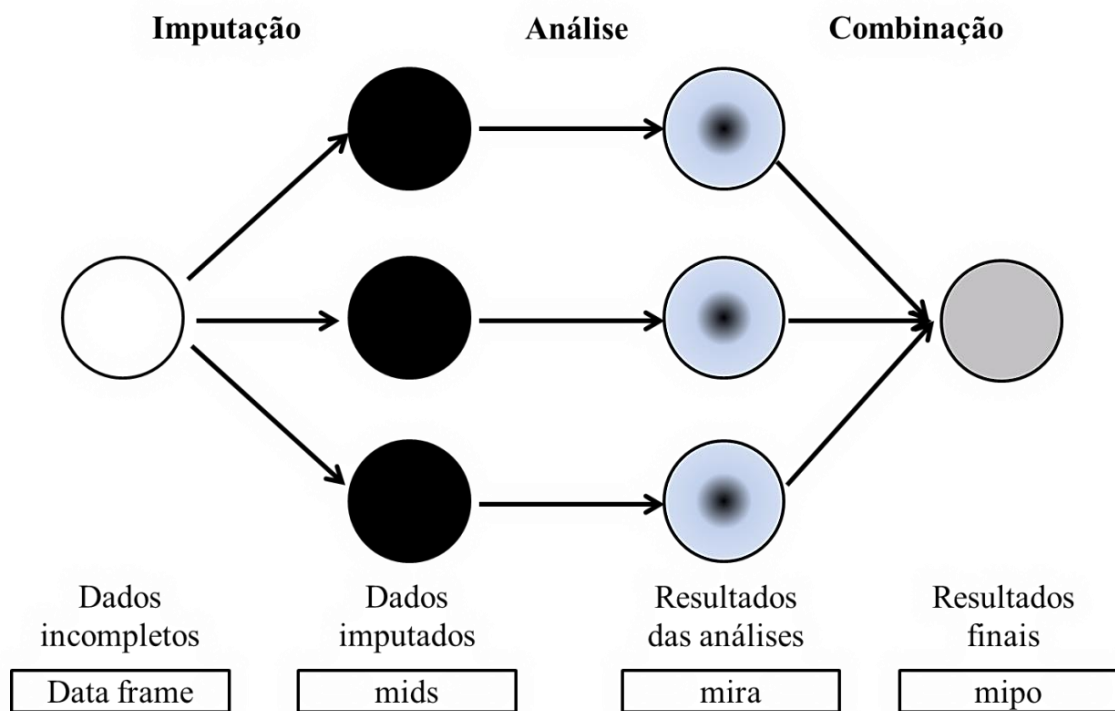
b) Proporção entre 0,05 e 0,15 → Imputação única pode ser usada provavelmente sem problemas, entretanto o uso da imputação múltipla é indicado.

c) Proporção $\geq 0,15$ → A imputação múltipla é indicada na maior parte dos modelos.

Se houver muitos preditores com dados faltantes devem ser feitas as mesmas considerações acima, mas os efeitos das imputações serão mais pronunciados. Quanto ao “MICE”, o mesmo é de domínio público, pois é operado dentro do ambiente do aplicativo R (The R Foundation for Statistical Computing, Viena, Áustria; <http://www.r-project.org>) e disponibilizado em forma de pacote. Este pacote suporta uma variedade de modelos de imputação, incluindo formas de comparação de médias preditivas e métodos de regressão, regressão logística e análise discriminante. Além disso, o MICE permite que os usuários programem suas próprias funções de imputação. A etapa de imputação é executada usando a função “mice ()” (HORTON e KLEINMAN, 2007). De acordo com Van Buuren e Groothuis-Oudshoorn (2011), a filosofia por trás da metodologia MICE é a imputação múltipla. Ela é realizada através de uma sequência de pequenos passos, cada um dos quais pode requerer verificação de diagnóstico.

Seja Y_j com $(j=1, \dots, p)$, um conjunto de p variáveis incompletas, onde $Y = (Y_1, \dots, Y_p)$. As porções observadas e faltantes de Y_j são denotadas por Y_j^{obs} e Y_j^{falhas} , respectivamente, então $Y^{obs} = (Y_1^{obs}, \dots, Y_p^{obs})$ e $Y^{falhas} = (Y_1^{falhas}, \dots, Y_p^{falhas})$, representam os dados observados e em falta de Y . O número de imputações deve ser sempre igual a $m \geq 1$. O conjunto de dados imputados h primeiro é dado por $Y^{(h)}$ onde $h=1, \dots, m$. Seja agora $Y_{-j} = (Y_1, \dots, Y_{j-1}, Y_{j+1}, \dots, Y_p)$ a coleção de variáveis $p-1$ em Y com exceção de Y_j . Seja Q a quantidade de dados faltantes a modelar. Na prática Q é frequentemente um vetor multivariado representando qualquer modelo a ser gerado para a modelagem dos dados faltantes (VAN BUUREN e GROOTHUIS- OUDSHOORN, 2011). A Figura 06 representa as principais etapas na imputação múltipla: imputação, análise e agrupamento.

Figura 06 – Esquema das principais etapas usadas na imputação múltipla (IM).



Fonte: Elaborado pelo autor e adaptado de Van Buuren e Groothuis-Oudshoorn, (2011).

O software armazena os resultados de cada etapa em classes específicas denominadas *mids*, *mira* e *mipo*, explicados em detalhes na Figura 06. O lado mais à esquerda da imagem indica que a análise começa com um conjunto de dados observados Y^{obs} . Segundo Van Buuren e Groothuis-Oudshoorn (2011), em geral, o problema é que não podemos estimar Q de Y^{obs} sem fazer suposições irreais sobre os dados não observados. Logo, dados faltantes são gerados aleatoriamente ao

conjunto de Y^{obs} , e várias versões de uma imputação múltipla são geradas, com valores plausíveis, de acordo com a natureza da variável, extraídos de uma distribuição especificamente modelada para cada entrada de valor para um respectivo dado em falta.

No MICE essa tarefa é feita pela função “mice ()”. A Figura 06 retrata $m=3$ dados imputados $Y^{(1)}, \dots, Y^{(3)}$. Os três conjuntos imputados são idênticos aos conjuntos de dados de entradas não faltantes, que diferenciam, logicamente, dos dados imputados. A magnitude destas diferenças reflete a incerteza sobre os valores a serem imputados (VAN BUUREN & GROOTHUIS-OUDSHOORN, 2011).

O segundo passo do modelo, segundo Van Buuren & Groothuis-Oudshoorn (2011) estima Q em cada conjunto de dados imputados, da mesma forma como em um conjunto de dados sem falhas. Isso é fácil, pois todos os conjuntos de dados estão completos. O modelo aplicado para $Y^{(1)}, \dots, Y^{(m)}$ é geralmente idêntico. O MICE contém uma função “with.mids ()” que realiza esta análise. As estimativas $\hat{Q}^{(1)}, \dots, \hat{Q}^{(m)}$ diferirá entre si porque a sua entrada de dados diferem. É importante perceber que essas diferenças são causadas por causa de nossa incerteza sobre qual valor imputar.

No MICE, os resultados da análise são armazenados coletivamente como a análise repetida imputada dentro de um objeto R da classe `mira`. O terceiro e último passo reuni m estimativas $\hat{Q}^{(1)}, \dots, \hat{Q}^{(m)}$ em uma única estimativa Q^{med} e estima sua variância. Para quantidades Q que são normalmente distribuídas, pode-se calcular a média sobre $\hat{Q}^{(1)}, \dots, \hat{Q}^{(m)}$ e somar com a variância de Q^{med} , de acordo com o método descrito em Rubin (1987). Os resultados da função são armazenados e agrupados como objeto da classe `mipo` (VAN BUUREN & GROOTHUIS-OUDSHOORN, 2011).

3.4.1.1 Média Preditiva ou “Método Predictive Mean Matching” (PMM)

Dentro do pacote MICE, o método escolhido para imputação foi o método “Predictive Mean Matching” (PMM), que é uma variante da regressão linear que determina um valor imputado calculado pelo modelo de regressão mais próximo do valor observado (LI et al., 1991; SCHAFER, 1997). Conforme Horton e Lipsitz (2001), é considerado mais preciso que outros métodos de imputação por estas características.

O método de IM PMM é considerado um método de baixa incerteza em razão de combinar elementos de regressão, vizinho mais próximo e imputação “*hot deck*” (técnicas paramétricas e não paramétricas). O PMM pode superar as dificuldades destas técnicas de imputação, dado o fato de que as técnicas paramétricas podem falhar quando o modelo não é adequado para os dados disponíveis e as técnicas não paramétricas exigem grande quantidade de observações (DI ZIO e GUARNERA, 2009). O PMM considera a seguinte formulação (Equação 2) para cada i faltante em Y (SCHAFER, 1997; LI et al., 1991).

Substituindo o valor faltante obtido pela regressão linear, tem-se:

$$Y^{obs} = \{Y_i^{obs} = X_i' \cdot \beta^* : i \in \text{obs}(Y)\} \quad \text{para cada } i \text{ faltante em } (Y) \quad (2)$$

Sendo:

X a variável sem dado faltante,

Y_i^{obs} o conjunto de valores observados,

$Y_i^* = X_i' \cdot \beta^*$ onde Y_i^{obs} é a observação encontrada correspondente ao valor mais próximo de Y_j^* .

Esta metodologia foi aplicada usando dados de temperatura máxima para exemplificar o procedimento. Uma coluna que apresentava falhas da estação meteorológica, série original, foi colocada ao lado de quatro colunas com dados similares que não apresentavam falhas, chamados de preditores e exemplificada na Tabela 05. Nas séries temporais que possuíam dados faltosos, as falhas foram caracterizadas por “NA”, sendo usado o número de imputações múltiplas padrão do pacote MICE, versão 3.5, ($m=50$ iterações), do software estatístico livre “R”, versão 3.5.2 (R CORE TEAM, 2018).

Para verificação do método do PMM, foi retirado da série original, o ano de 2015 (para todas as estações do INMET, com exceção de Propriá que foi o ano de 2014), com dados medidos e sem falhas para que, falhas fossem geradas artificialmente no ano selecionado e, o método fosse novamente empregado, a fim de comparar dados realmente observados com a imputação gerada. Dessa forma foi possível avaliar a habilidade do método.

Tabela 05 – Exemplificação de dados imputados, representados por NA, referentes à estação de Pão de Açúcar-AL (código OMM: 81994) (a), e dados com as falhas preenchidas (b). Os dados originais (coluna OBS) estão ao lado das séries gradeadas mais próximas, ou conjunto de preditores (Gr1; Gr2; Gr3 e Gr4). As falhas preenchidas estão destacadas em vermelho.

(a)							(b)						
Ano	Dia	OBS	Gr1	Gr2	Gr3	Gr4	Ano	Dia	OBS	Gr1	Gr2	Gr3	Gr4
2013	01	31,8	37,1	36,1	37,2	36,2	2013	01	31,8	37,1	36,1	37,2	36,2
2013	02	32,2	36,5	35,6	36,5	35,6	2013	02	32,2	36,5	35,6	36,5	35,6
2013	03	NA	36,5	35,2	36,4	35,1	2013	03	37,6	36,5	35,2	36,4	35,1
2013	04	NA	36,9	35,8	37,0	35,7	2013	04	37,6	36,9	35,8	37,0	35,7
2013	05	31	37,2	36,0	37,2	36,0	2013	05	31,0	37,2	36,0	37,2	36,0
2013	06	NA	35,5	34,4	35,5	34,6	2013	06	34,7	35,5	34,4	35,5	34,6
2013	07	NA	36,8	35,5	36,7	35,6	2013	07	37,2	36,8	35,5	36,7	35,6
2013	08	31,8	35,8	34,1	35,7	34,2	2013	08	31,8	35,8	34,1	35,7	34,2
2013	09	30,9	35,4	33,9	35,4	34,0	2013	09	30,9	35,4	33,9	35,4	34,0
2013	10	29,3	35,6	34,3	35,5	34,3	2013	10	29,3	35,6	34,3	35,5	34,3

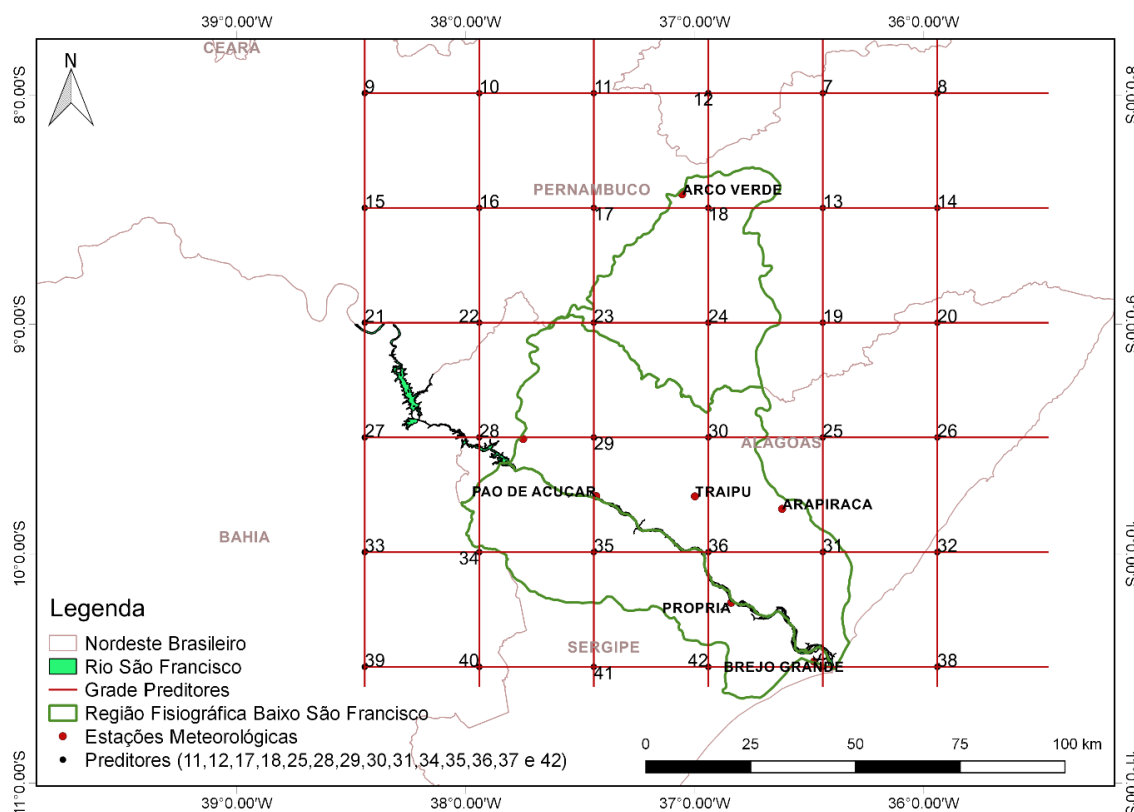
Fonte: Autor (2019)

Estatísticas como correlações (r) e a raiz do erro quadrático médio (REQM) foram calculadas para estes períodos de verificação com o objetivo de validação da metodologia.

3.4.1.2 Escolha dos preditores

Utilizou-se a técnica MICE para preenchimentos de dados com falhas das variáveis “temperatura máxima e mínima, temperatura do ponto de orvalho, pressão, velocidade do vento, radiação global, umidade relativa e precipitação”. Foram usados como conjuntos de preditores (Figura 07), séries da análise gradeada, com resolução espacial de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, do projeto Previsão dos Recursos Energéticos Mundiais (Prediction of the Worldwide Energy Resources - POWER), iniciado sob pesquisa da Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (National Aeronautics and Space Administration - NASA), sob a direção do Programa de Gestão de Energia de Ciência Aplicada. De acordo com Zhang (2007), estes dados provaram ser confiáveis e úteis para as indústrias de energia renovável.

Figura 07 – Grade com preditores utilizados para o preenchimento de falhas das estações do Baixo São Francisco.



Fonte: Autor (2019)

Segundo Zhang (2007), o projeto POWER deriva seus dados principalmente do Programa de Pesquisa Clima Mundial da NASA (NASA's World Climate Research Programme - WCRP), Ciclo de Experiência Energia Global e Água (Global Energy and Water Cycle Experiment - GEWEX), Balanço de Radiação de Superfície (Surface Radiation Budget - SRB), modelagem global e Escritório de Assimilação (Global Modeling and Assimilation Office - GMAO) e Sistema de Observação do Goddard Earth (Goddard Earth Observing System - GEOS). Os dados do POWER estão disponíveis para os usuários através do website (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>).

O quadro que apresenta um detalhamento de preditores, do projeto Previsão dos Recursos Energéticos Mundiais (Prediction of the Worldwide Energy Resources - POWER), utilizados para imputação dos dados faltantes das estações de superfície, está no Apêndice A. A grade correspondente para seleção dos preditores teve dimensão referente à: Longitude (-38.4418602883/-35.4595635813) e Latitude (-10.5766167659/-7.49253518842).

3.5 Teste de consistência

As estatísticas básicas foram calculadas para a escala de tempo diária. Foi utilizado como forma de auxiliar a análise estatística o coeficiente de correlação de Pearson (r) (Equação 3), onde o mesmo mede a força da relação linear entre dados observados e imputados.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) * (P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (3)$$

Em que: r é o coeficiente de correlação de Pearson, adimensional. Ele varia entre $[-1,1]$, sendo a pontuação perfeita igual a 1. Sendo as variáveis (observações (O) e imputações(P)), onde \bar{O} e \bar{P} são médias. Segue Tabela 06 abaixo com apresentação detalhada da interpretação do método estatístico.

Tabela 06 – Coeficiente de correlação estatística ou coeficiente de correlação de Pearson.

Intervalos	Definição
0,00 a 0,19	Correlação bem fraca
0,20 a 0,39	Correlação fraca
0,40 a 0,69	Correlação moderada
0,70 a 0,89	Correlação forte
0,90 a 1,00	Correlação muito forte

Fonte: Devore, (2006).

O teste paramétrico t-Student, de acordo com Huang & Paes (2009), pode ser utilizado para avaliar o grau de relação entre as variáveis em questão. Na garantia de que o valor de r refletisse a concordância entre observações e imputações, o teste t-Student foi utilizado com a condição de que o tamanho da amostra N , da qual se obtém o valor do coeficiente de correlação r , seja ≥ 6 . Logo, para encontrar o valor de t , utilizou-se a Equação 4:

$$t = \frac{r}{\sqrt{(1 - r^2)/(N - 2)}} \quad (4)$$

A Equação 5 é uma distribuição para t com $N - 2$ graus de liberdade. Uma vez obtido o valor de t , pode-se extrair o coeficiente de correlação crítico (r_c), que é um

valor para a qual se aceita ou não a hipótese estatística que existe correlação entre os dados simulados e imputados. O r_c é dado por:

$$r_c = \sqrt{\frac{t^2}{(N-2) + t^2}} \quad (5)$$

Neste estudo também foi utilizado a raiz do erro quadrático médio (REQM), dado pela Equação 6, em que N é o número total de elementos da amostra, P corresponde às imputações e O refere-se às observações em cada momento i .

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (6)$$

O coeficiente de correlação e o REQM foram utilizados no procedimento para validação dos cálculos de Evaporação e Evapotranspiração para o período de 2009-2018 para dados de superfície. A REQM mede a magnitude média dos erros de previsão e sua pontuação varia entre $[0, \infty)$.

3.6 Estimativa de dados faltosos das estações da Agritempo/Embrapa

O boletim N°56 da FAO apresenta a metodologia que se deve utilizar na falta de dados. Quando apenas os registros de temperatura estão disponíveis dois procedimentos são propostos por Allen et al. (1998). O primeiro deles é o método de Penman-Monteith/FAO com dados estimados de umidade relativa, velocidade do vento e radiação. Depois da publicação do boletim FAO, o método de Penman-Monteith/FAO passou a ser recomendado como o método-padrão para determinar a Evapotranspiração de Referência (ET_o). O segundo procedimento é o método de Hargreaves e Samani (1985), proposto por Allen et al. (1998) como alternativa para a estimativa da evapotranspiração, quando somente os dados de temperatura do ar são disponíveis nas estações meteorológicas.

Neste trabalho os métodos foram adaptados e utilizados para a estimativa da Evaporação e Evapotranspiração no Baixo São Francisco, calculado apenas para o município de Piranhas-AL e Traipú-AL, utilizando dados de temperatura da estação climatológica da Agritempo de acordo com a Tabela 4.

3.6.1 Umidade Relativa

Segundo Allen et al. (1998), na falta de dados de umidade relativa ou quando os dados são de qualidade questionável, uma estimativa da pressão de vapor real (e_a), pode ser obtida assumindo que a temperatura do ponto de orvalho (T_d) está próxima da temperatura mínima (T_{min}). Esta declaração pressupõe implicitamente que ao nascer do sol, quando a temperatura do ar está próxima da T_{min} , é porque o ar está quase saturado com vapor de água e a umidade é quase 100%. Se T_{min} é usada para representar T_d então temos a Equação 7:

$$e_a = e(T_{min}) = 0,611 \exp \left[\frac{17,27 \times T_{min}}{T_{min} + 237,3} \right] \quad (7)$$

Em regiões áridas, o ar pode não estar saturado quando a temperatura está no mínimo. Assim, T_{min} pode ser maior que T_d , então a calibração pode ser necessária para estimar as temperaturas do ponto de orvalho. Nestas situações, “ T_{min} ” na equação acima pode ser melhor aproximada subtraindo 2-3 °C da T_{min} . Neste trabalho foi subtraído 2°C de T_{min} (ALLEN et al., 1998).

3.6.2 Velocidade do Vento

ALLEN et al. (1998) relata que como a variação da velocidade média do vento em períodos mensais é relativamente baixa, os valores mensais da velocidade do vento podem ser estimados para o cálculo da ETo. As estimativas da média da velocidade do vento podem ser obtidas a partir de informações disponíveis para o clima regional, mas devem-se levar em conta as alterações sazonais.

Quando os dados de vento na região não estão disponíveis, um valor de 2 m.s⁻¹ pode ser usado como uma estimativa provisória. Este valor é uma média de mais de 2.000 estações meteorológicas estudadas ao redor do mundo (ALLEN et al., 1998). Neste estudo foi adotado o valor de 2 m.s⁻¹ para as estações de Piranhas e Traipú.

3.6.3 Radiação Solar

Os dados de radiação solar, derivados de diferenças de temperatura do ar (temperatura máxima e mínima), estão relacionados com o grau de cobertura de nuvens em um local. Condições de céu claro resultam em altas temperaturas

durante o dia (T_{max}), porque a atmosfera é transparente para a radiação solar incidente e em baixas temperaturas durante a noite (T_{min}), porque menos radiação de onda longa é absorvida pela atmosfera (ALLEN et al.,1998).

Por outro lado, em condições nubladas, o T_{max} é relativamente menor porque parte significativa da radiação solar que chega nunca chega à superfície da Terra, onde parte é absorvida e outra parte refletida pelas nuvens. Da mesma forma, a T_{min} será relativamente mais alta, pois a cobertura de nuvens atua como um cobertor e diminui a radiação de onda longa. Portanto, a diferença entre a temperatura máxima e mínima do ar ($T_{max} - T_{min}$) pode ser usada como um indicador da fração de radiação extraterrestre que atinge a superfície da Terra. Este princípio tem sido utilizado por Hargreaves e Samani (1985) para desenvolver estimativas de ETo usando apenas dados de temperatura do ar (ALLEN et al.,1998).

A fórmula de radiação de Hargreaves e Samani (1985), ajustada e validada em várias estações meteorológicas em uma variedade de condições climáticas, torna-se a Equação 8:

$$R_s = k_{RS} \sqrt{(T_{max} - T_{min})} R_a \quad (8)$$

Onde:

R_a é a radiação extraterrestre ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$),

T_{max} temperatura do ar máxima [$^{\circ}C$],

T_{min} temperatura do ar mínima [$^{\circ}C$],

k_{RS} coeficiente de ajuste [$^{\circ}C^{-0.5}$].

O coeficiente de ajuste k_{RS} é empírico e difere para regiões de "interiores" ou "costeiras". Varia de 0,16 a 0,19 onde:

- para locais "interiores", onde a massa da terra domina e as massas de ar não são influenciadas por uma grande massa de água, $k_{RS} \cong 0,16$ (para esse estudo);
- para localizações costeiras, adjacentes à costa de uma grande massa terrestre onde as massas de ar são influenciadas por um corpo d'água próximo, $k_{RS} \cong 0,19$.

3.7 Ajuste dos dados de superfície para velocidade do vento

As velocidades do vento medidas em diferentes alturas acima da superfície do solo são diferentes. A fricção de superfície tende a desacelerar o vento passando

por cima dele. A velocidade do vento é mais lenta na superfície e aumenta com altura. Por esta razão, os anemômetros são colocados a uma altura padrão escolhida, ou seja, 10 m para a meteorologia e 2 ou 3 m em agrometeorologia. No cálculo da evapotranspiração, a velocidade do vento medida a 2 m acima da superfície é necessária (ALLEN et al., 1998). Logo, para ajustar os dados da velocidade do vento obtidos por instrumentos (no caso das estações meteorológicas do INMET) colocados em altitudes diferentes da altura padrão de 2 m, foi utilizada a Equação 9 sugerida pelo Boletim56 da FAO:

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8 z - 5,42)} \quad (9)$$

Onde:

u_2 é a velocidade do vento a 2m acima da superfície do solo ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),

u_z é a medida da velocidade do vento a z m acima da superfície do solo ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),

z é a altura de medição acima da superfície do solo (m).

3.8 Dados orbitais obtidos do LSA-SAF

Foram utilizados os dados de Evapotranspiração Real (ET_r) do produto “*Land Surface Analysis-Satellite Application Facilities*” (LSA-SAF), obtido por meio de imagens do satélite Meteosat de segunda Geração (MSG-2), para o período de 2011 a 2018, adquiridos via download diretamente do portal < <https://landsaf.ipma.pt/en>>, os quais estão disponíveis para a Europa, a África e América do Sul em formato de arquivo do tipo “HDF5” (*Hierarchical Data Format*).

O produto LSA-SAF ET a partir de imagens obtidas a cada quinze minutos pelo sensor SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) apresenta dois formatos de acordo com o período de lançamento do produto: as estimativas ET instantâneas do tipo (MET), possui uma resolução temporal de 30 minutos, ou seja, teoricamente são gerados 48 produtos por dia. Já o produto ET (DMET) é derivado através da integração valores instantâneos durante todo o dia, portanto de resolução temporal diária. Nesse estudo foram utilizados os dados diários ET (DMET) referente ao período de 2011-2018. Detalhes do produto estão descritos na Tabela 07.

Tabela 07 – Características do produto de Evapotranspiração DMET-LSA/SAF

Características do Produto	DMET ET_SEVIRI
Nome do Produto	Evapotranspiração diária
Código	DMET
Período	01/01/2011 até os dias atuais
Cobertura	MSG disk
Resolução Temporal	1 dia
Resolução Espacial	3 Km
Unidade	mm/dia
Alcance	0-10
Acurácia	20%

Fonte: (CAMACHO, 2015).

3.8.1 Nome do Arquivo ET (DMET)

O nome dos arquivos internos, de entrada e saída do LSA-SAF é uma cadeia de até 255 caracteres feitos de seis campos separados por “underline (_)” com forma descrita abaixo (CAMACHO, 2009):

“FORMAT_FREE_SOURCE_VARIABLE_AREA_DATE”

Onde:

- FORMAT é (HDF5) para todos os arquivos de saída;
- FREE é um campo livre;
- SOURCE é o provedor de dados (MSG);
- VARIABLE é o parâmetro ou produto armazenado no arquivo (ET ou DMET);
- AREA é uma das regiões processadas: Euro (Europa), NAfr (Norte da África), SAfr (Sul da África), SAme (América do Sul) e Full (aplica-se a outro produto) ou MSG Disk (Todo o globo);
- DATE é o intervalo de tempo ou a hora em que o produto é definido para ser válido.

Para produtos diários: hhmm (ss) = "0000 (00)"

Uma observação a ser feita é que se os dados são divulgados através do EUMETCast (sistema de divulgação da EUMETSAT para a entrega em tempo quase

real de dados e produtos de satélite), o campo FORMAT é prefixado por "S-LSA_". Dessa forma, os arquivos são constituídos no formato:

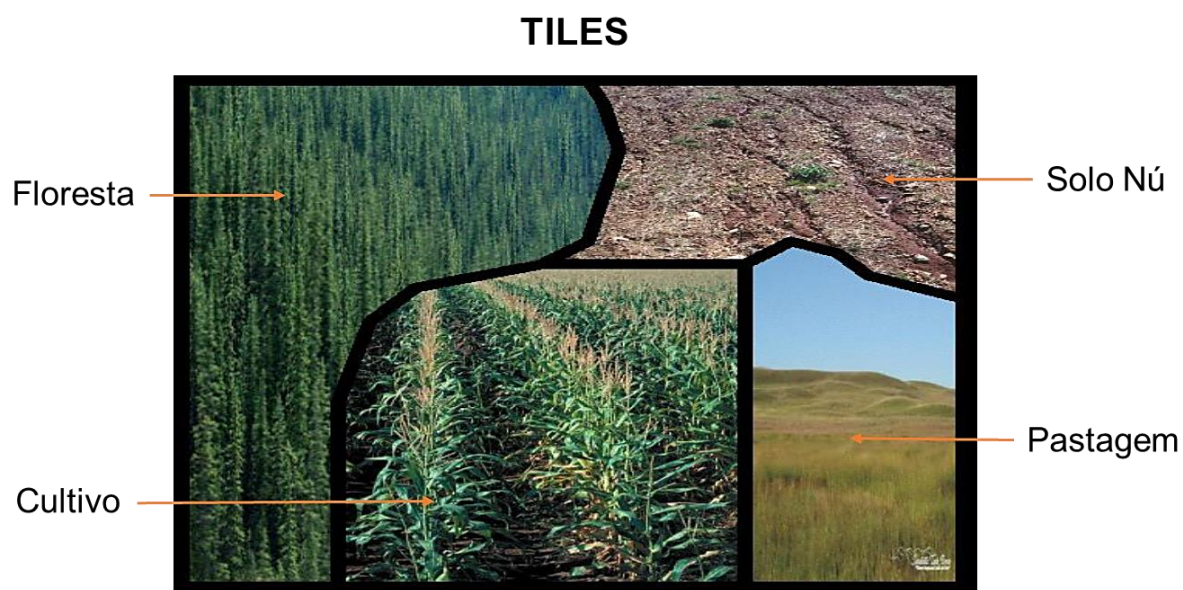
"HDF5_LSASAF_MSG_DMET_SAmE_201401250000"

3.8.2 Descrição geral do algoritmo do produto ET

A descrição do algoritmo de acordo com Camacho (2015) apresenta dois produtos de evapotranspiração: estimativas instantâneas de ET, com intervalo de tempo de 30 minutos (MET) e o produto de ET diária (DMET) integrando valores instantâneos durante o dia. Este produto posterior é gerado com um algoritmo comum usando para integração ao longo de dias fluxos radiativos derivados de LSA-SAF que são fluxos de ondas curtas (DSSF - Down-welling Short-wave Fluxes) e fluxos de ondas longas (DSLFL - Down-welling Long-wave Fluxes).

No método proposto, a área para a qual o ET deve ser avaliado é dividida em pixels independentes, em uma correspondência um para um com os pixels de uma imagem de satélite. Cada pixel é por sua vez considerado como uma mistura de "tiles" homogêneos, cada "tile" representando uma superfície específica do solo: solo nu, pastagem, florestas, etc. Na Figura 08, uma representação esquemática da composição do pixel da imagem é apresentada.

Figura 08 – Representação esquemática da composição do pixel



Fonte: (CAMACHO, 2015).

O conjunto principal de equações usadas para derivar ET é comum à maioria dos esquemas de Transferência de Solo-Vegetação-Atmosfera (SVAT) do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas a Médio Prazo, o ECMWF, do inglês (The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), em que algumas adaptações foram feitas para utilizar dados derivados de SR. (VAN DEN HURK et al., 2000).

Negligenciando o armazenamento de energia na camada de vegetação, cada “tile” satisfaz um balanço de energia dado pela Equação 10a:

$$Rn_i = H_i + LE_i + G_i \quad (10a)$$

Com a Equação 10b.

$$Rn_i = (1 - \alpha)S_{\downarrow} + \varepsilon(L_{\downarrow} - \sigma T_{sk,i}^4) \quad (10b)$$

Nestas equações, o índice i refere-se a um dado “tile”, α e ε são respectivamente albedo (produto albedo do LSA-SAF) e emissividade (0,99 por enquanto, a emissividade LSA-SAF está prevista para ser usado em versões futuras), S_{\downarrow} e L_{\downarrow} o Fluxo de Ondas Curtas de Superfície Descendente (DSSF) e o fluxo de onda longa de superfície descendente (DSLRF), H_i e LE_i são o fluxo de calor sensível e latente, respectivamente, G_i é o fluxo de calor para o solo, $T_{sk,i}^4$, a temperatura da superfície próxima ao solo e σ é a Constante de Stephan-Boltzmann. Rn_i , S_{\downarrow} , e L_{\downarrow} são positivos para baixo enquanto H_i , LE_i e G_i são positivos para cima.

Os fluxos de calor latente e sensível são obtidos através das equações 11 e 12:

$$LE_i = \frac{L_v \rho_a}{r_a + r_c} [q_{sat}(T_{sk,i}) - q_a(T_a)] \quad (11)$$

$$H_i = \frac{\rho_a}{r_a} [c_p(T_{sk,i} - T_a) - g z_a] \quad (12)$$

Onde a ρ_a é a densidade do ar, r_a a resistência aerodinâmica, a T_a é a temperatura do ar, z_a a altura de medição dos parâmetros do ar, r_c a resistência do dossel, L_v o calor latente de vaporização (função da temperatura do ar), q_a a

umidade específica e q_{sat} é a umidade específica na saturação. A resistência do dossel r_c é uma função do DSSF, índice de área foliar (LAI).

O fluxo de calor no solo é estimado de acordo com a Equação 13:

$$G_i = \beta_i * Rn_i \quad (13)$$

Neste coeficiente de equação β_i é estimado em função do Índice de Área Foliar (IAF), através do Índice de Vegetação Ajustada do Solo Modificado -MSAVI- (Chehbouni et al., 1996), de acordo com as Equações 14 e 15:

$$\beta_i = 0,5 * \text{EXP} (-2,13 * \text{MSAVI}_i) \quad (14)$$

$$\text{MSAVI}_i = 0,88 - 0,78 * \text{EXP} (-0,6 * \text{LAI}_i) \quad (15)$$

No nível do pixel temos a Equação 16:

$$LE = \sum \zeta_i LE_i \quad \text{e} \quad H = \sum \zeta_i H_i \quad (16)$$

Onde ζ_i é a cobertura relativa do “tile” no pixel.

O LE obtido, expresso em W/m^2 , é convertido em evapotranspiração (em mm / h) através da Equação 17:

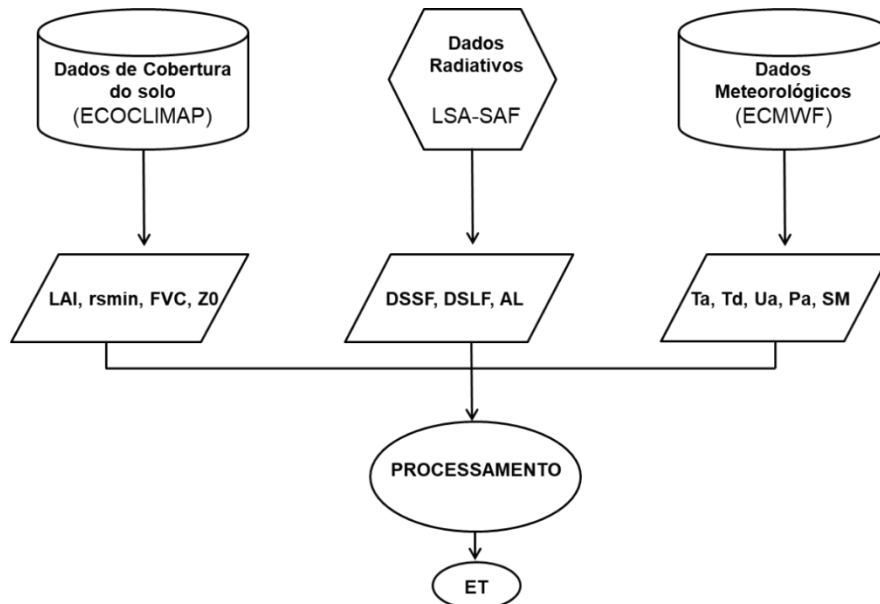
$$ET = 3600 LE / Lv \quad (17)$$

3.8.3 Dados orbitais de entrada para o produto ET

No que se referem aos dados radiativos, as principais variáveis que conduzem o modelo são obtidas dos produtos LSA-SAF. Estas variáveis são inicialmente o Fluxo de Ondas Curtas na Superfície Descendente (DSSF), baseado nos três canais de ondas curtas (VIS 0,6 μm , NIR 0,8 μm , SWIR 1,6 μm), conforme Figura 09. Em segundo lugar, o Fluxo de Ondas Longas de Superfície Descendente (DSLDF) é obtido por um método híbrido baseado em dois esquemas diferentes de parametrização, para condições de céu claro e nublado, usando como entrada previsões do ECMWF de temperatura (2,0m), temperatura de ponto de orvalho (2,0m) e água total da coluna. Finalmente, o produto albedo (AL) é usado como

entrada, baseado nos três canais de ondas curtas (VIS 0,6 μm , NIR 0,8 μm , SWIR 1,6 μm) (CAMACHO, 2015).

Figura 09 – Diagrama simplificado de cadeia de processamento da Evapotranspiração (ET) com suas bases de entrada de dados.



Fonte: Adaptação do Manual do Produto (2015)

Quanto aos dados meteorológicos, os dados auxiliares necessários pelo algoritmo MET são automaticamente recuperados das previsões do ECMWF pelos módulos de processamento do sistema LSA-SAF. Esses dados originalmente reunidos na resolução espacial do ECMWF são transpostos para a grade de MSG e espacialmente interpolados. Atualmente, as variáveis meteorológicas utilizadas pelo algoritmo MET são: Ta-temperatura [K] (2,0m), Td-temperatura do ponto de orvalho [K] (2,0m), Ua-velocidade do vento (10 m) [m/s], Pa-Pressão atmosférica ao nível do mar [Pa], SM-Umididade do solo para 4 camadas de solo [m³/m³], Temperatura do solo para 4 camadas de solo [K] (CAMACHO, 2015).

Quanto a cobertura do solo, o algoritmo MET utiliza a classificação de cobertura do solo ECOCLIMAP (Masson *et al.*, 2003), reamostrada para resolução espacial do MSG (a resolução original do ECOCLIMAP é de um quilômetro). Nesta base de dados, os parâmetros associados a um dado “tile” variam temporalmente (mensalmente) e espacialmente (os parâmetros associados aos “tiles” dependem da região climática considerada). Os dados de cobertura do solo são: LAI-Índice de

Área Foliar, r_{smin} -resistência estomática mínima do “tile”, FVC-Fração de Cobertura Vegetal e Z0-parâmetro de altura das medições.

O algoritmo Evapotranspiração (ET) desenvolvido no âmbito do LSA-SAF tem como objetivo a quantificação do fluxo de vapor de água da superfície do solo (solo e copa) para a atmosfera usando dados de entrada derivados de satélites MSG. O método segue uma abordagem física e pode ser descrito como um módulo simplificado de Transferência de Solo-Vegetação-Atmosfera (SVAT), modificado para aceitar como forçar dados derivados de dados de sensoriamento remoto, combinados com dados de outras fontes (CAMACHO, 2015).

3.8.4 Produto diário (ET - DMET)

O produto de evapotranspiração diária é obtido pela integração temporal de valores instantâneos (Equação 18). O procedimento implementado considera os (slots) valores em falta, levando em conta uma taxa equivalente à média entre dois slots existentes (um anterior ao outro após o slot / valor ausente).

$$DMET = \int_{h_1}^{h_2} MET_i(t) dt \quad (18)$$

Onde MET_i é a evapotranspiração instantânea estimada, os limites de integração (h_1 e h_2) correspondem ao primeiro (teoricamente às 00:30 UTC) e ao último (teoricamente às 24:00 UTC) slots existentes para um determinado dia, dt é o passo de integração (30 minutos). Em situação ideal (não há slots ausentes) 48 imagens são integradas para um determinado dia (CAMACHO, 2015).

3.8.5 Organização e conversão dos dados orbitais LSA SAF

Após download dos dados de ET e organizado os mesmos, ano a ano, foi utilizado um *script* desenvolvido no Laboratório de Análises e Processamento de Imagens de Satélite para realização de processamento dos dados recebidos. As etapas desse processamento foram executadas no sistema operacional LINUX e são apresentadas a seguir:

1° Passo: Descompactação do arquivo “bunzip2”;

2° Passo: Importação dos dados brutos de ET no padrão “.hdf” para o formato “.zip”;

3º Passo: Conversão do fator de escala de ET utilizando a equação iff ($ND > -1$, $ND / 10000,0$), onde ND é o número digital;

4º Passo: Recorte do produto ET através de máscara formato “.shp” da área de estudo;

5º Passo: Extração dos dados para os pontos referentes às estações escolhidas para estudo;

Após extração dos dados, os mesmos foram organizados em planilha “.csv” para produção de gráficos no “R”.

3.9 Estimativa de Evaporação e Evapotranspiração com dados de superfície

O estudo foi baseado nos métodos de Penman (1948) para evaporação e Penman-Monteith (FAO56) para evapotranspiração, com base nos estudos exitosos já referenciados na revisão de literatura deste trabalho.

3.9.1 Estimativa da Evaporação pelo Método de Penman (1948)

A evaporação (mm.dia^{-1}) estimada pela Equação 19 para as estações meteorológicas do estudo, seguiu ao modelo proposto por Penman (1948):

$$E_L = \frac{0,408 \left(\frac{s}{\gamma}\right) R_n + E_a}{\left(\frac{s}{\gamma}\right) + 1} \quad (19)$$

Em que:

E_L – evaporação da superfície de água livremente exposta à atmosfera (mm.dia^{-1})

R_n - saldo diário de radiação medido sobre a superfície de água livre ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$);

s - coeficiente angular da curva de saturação de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

γ - coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

E_a - poder evaporante da superfície (mm.dia^{-1}).

O valor de s será calculado pela Equação 20:

$$s = \frac{0,408 \cdot e_s}{(T_{ar} + 237,3)^2} \quad (20)$$

em que:

e_s - pressão saturante de vapor na temperatura média do bulbo úmido e do bulbo seco (kPa) e T_{ar} - temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$).

Segundo Villa Nova et al. (2002), a proposta de Penman para cálculo de s é de se trabalhar com a média da temperatura do bulbo úmido e do bulbo seco, embora comumente se use somente a temperatura do ar (correspondente à do bulbo seco).

O termo aerodinâmico (E_a) será calculado pelas Equações 21 e 22:

$$E_a = f(U) \cdot (e_s - e_a) \quad (21)$$

em que:

U - velocidade do vento à 2,0 m de altura (km dia^{-1});

e_s - pressão de saturação do ar (mm Hg);

e_a - pressão atual de vapor do ar (mm Hg);

$f(U)$ - função do vento, dada por (DOORENBOS e PRUITT, 1977):

$$f(U) = 0,35 \cdot \left(0,5 + \frac{U}{160} \right) \quad (22)$$

No uso desse método com dados de estações meteorológicas, foi adotado o critério de somente trabalhar com valores de temperatura de bulbo seco no cálculo de s . Os cálculos da evaporação diária foram realizados compreendendo o período diário (24 horas). Ressaltando que foram usados somente cálculos para valores de 24 horas, uniformizando o critério de cálculo nessa escala de tempo.

3.9.2 Estimativa da Evapotranspiração pelo método de Peman-Monteith (FAO)

Este é um método combinado que consiste em associar os termos diabáticos (saldo de energia na superfície) e adiabáticos (processos de transferência pelos componentes aerodinâmicos) da evaporação. Posteriormente foi incluída a função de resistência da superfície para transferência de vapor, dando origem à equação de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998).

O método FAO Penman-Monteith é recomendado como o único método para determinar a evapotranspiração de referência (ET_o). Foi desenvolvido e definido considerando uma cultura de referência como uma cultura hipotética, a uma altura

assumida de 0,12 m tendo uma resistência superficial de 70 s.m⁻¹ e um albedo de 0,23, assemelhando-se à evaporação de uma superfície de extensão de grama verde, de altura uniforme, crescendo ativamente e adequadamente regada. O método supera as deficiências do método anterior da FAO Penman e fornece valores mais consistentes com os dados reais de uso de água da cultura em todo o mundo (ALLEN et al., 1998).

A Equação 23 representa o modelo padrão FAO Penman-Monteith.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (23)$$

onde:

ET_o é a Evapotranspiração de Referência em (mm.dia⁻¹).

Rn é o saldo de radiação [MJ.m⁻².dia⁻¹]

G fluxo de calor no solo, valor desprezível e considerado nulo [MJ.m⁻².dia⁻¹],

e_s pressão de saturação de vapor d'água e *e_a* pressão real de vapor [kPa],

Δ inclinação da curva de pressão de saturação do vapor d'água em função da temperatura [kPa.°C⁻¹] e γ constante psicrométrica [kPa.°C⁻¹],

T temperatura média diária do ar a dois metros de altura [°C] e

u₂ velocidade média do vento a dois metros de altura [m.s⁻¹].

Os parâmetros da equação 23 foram calculados pelas Equações 24 a 38, representados na Tabela 08, recomendadas por Allen et al. (1998).

Tabela 08 – Parâmetros da equação 23 calculados pelas Equações 24 a 38.

Fórmula	N°
$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 \exp \left(\frac{17,27 T_{med}}{(T_{med} + 237,3)^2} \right) \right]}{(T_{med} + 237,3)}$	(24)
$\gamma = 0,665 * 10^{-3} P$	(25)
$Rn = R_{ns} - R_{nl}$	(26)
$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s$	(27)
$R_{nl} = \sigma \left[\left(\frac{T_{max,k^4} + T_{min,k^4}}{2} \right) \right] (0,34 - 0,14 \sqrt{ea}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right)$	(28)
$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{365} J \right)$	(29)
$\delta = 0,409 \text{ sen} \left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39 \right)$	(30)
$\omega = \arcsin [-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)]$	(31)
$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a$	(32)
$R_{so} = (0,75 + 2 * 10^{-5} * z) R_a$	(33)
$R_a = \frac{24 \cdot (60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \text{ sen}(\varphi) \cdot \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \text{ sen}(\omega_s)]$	(34)
$e^0(T_{max}) = 0,6108 \cdot \exp \left[\frac{17,27 \cdot T_{max}}{T_{max} + 237,3} \right]$	(35)
$e^0(T_{min}) = 0,6108 \cdot \exp \left[\frac{17,27 \cdot T_{min}}{T_{min} + 237,3} \right]$	(36)
$e_s = \frac{e^0(T_{max}) + e^0(T_{min})}{2}$	(37)
$e_a = \frac{\left[e^0(T_{min}) \frac{UR_{max}}{100} \right] + \left[e^0(T_{max}) \frac{UR_{min}}{100} \right]}{2}$	(38)

Fonte: Autor (2019)

Onde as unidades das equações representadas na Tabela 08 são:

E_{To} é a evapotranspiração de referência (mm.d^{-1});
 R_n é o saldo de radiação na superfície da cultura em ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$);
 G a densidade de fluxo de calor no solo em ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$);
 T_{med} é a temperatura média diária em ($^{\circ}\text{C}$);
 U_2 é a velocidade média do vento medida a 2 metros de altura (m.s^{-1});
 $0,408$ corresponde a $1/\lambda$, sendo λ o calor latente de evaporação da água, igual a ($2,45 \text{ MJ.Kg}^{-1}$ a 20°C);
 γ é o coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$);
 P é a pressão atmosférica [kPa],
 e_s é a pressão de vapor de saturação em (kPa);
 e_a é a pressão real de vapor em (kPa);
 Δ a tangente à curva da pressão de saturação do vapor d'água ($\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$);
 R_s é a radiação solar global;
 os valores de a_s e b_s equivalem a 0,25 e 0,50, respectivamente;
 R_{ns} é o saldo de onda curta ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$);
 R_{nl} é o saldo de radiação de onda longa ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$);
 α é o albedo da cultura de referência (0,23);
 R_{so} é a radiação solar a céu claro ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$);
 R_a é a radiação solar no topo da atmosfera ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$);
 G_{sc} é a constante solar ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{min}^{-1}$);
 dr é o inverso da distância relativa entre a Terra e o sol;
 ω_s é o ângulo horário solar (rad);
 δ é a declinação solar (rad);
 φ é a latitude (rad) e
 J é o dia do ano entre 1 (1° de janeiro) a 365 (31 de dezembro) ou 366, para ano bissexto.

Os valores do fluxo de calor no solo (G) para escala diária foram desconsiderados, pois conforme Allen et al. (1998) a magnitude do fluxo de calor do solo para períodos de um ou dez dias sob uma superfície gramada é relativamente pequena, podendo ser desconsiderada.

3.10 Estatística descritiva dos dados de superfície

A estatística descritiva ajuda na produção de uma visão mais geral do comportamento dos dados. Neste trabalho, primeiramente os dados foram agrupados e ordenados cronologicamente, de forma diária, mensal e anual. Foram estimadas medida de posição ou medida de tendência central (média) e medidas de variação ou dispersão de um conjunto de dados (desvio padrão e coeficiente de variação). Uma medida de posição utilizada foi a média. A média aritmética diária mede a tendência central em uma amostra. Ela é calculada a partir da Equação 39.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (39)$$

Onde, \bar{X} é a média amostral e n é o tamanho da amostra.

Quanto às formas de quantificar a variabilidade ou dispersão de um conjunto de dados, foram utilizadas as mais conhecidas: a Variância (S^2), o Desvio Padrão (S) e o Coeficiente de Variação (CV). Todas elas usam uma medida de posição como referência e dizem a proximidade ou afastamento dos dados com relação à medida de posição usada. O (CV) expressa em porcentagem o quanto o valor observado está distante da média. Essas medidas são definidas pelas (Equações 40, 41 e 42).

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum (X_i - \bar{X})^2 \quad (40)$$

$$S = \sqrt{S^2} \quad (41)$$

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} 100\% \quad (42)$$

As descrições das equações podem ser encontradas com maiores detalhes em Bussab e Morettin (2010). Os gráficos e cálculos necessários foram realizados por meio de funções do programa “R”.

3.11 Análise dos dados de evaporação e evapotranspiração

As análises dos dados foram feitas a partir de gráficos “boxplots”, descritos por Wilks (2006), gráficos de barras e linhas, bem como tabelas e quadros. Todos os gráficos e estatísticas necessárias foram realizadas por meio de funções do programa “R”. Também foram comparados os resultados das estimativas na região do Baixo São Francisco.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Preenchimento de falhas com método PMM (Predictive Mean Matching) e validação dos dados

As estações meteorológicas escolhidas do INMET e EMBRAPA para o estudo, apresentaram dados com falhas para as variáveis: temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura do ponto de orvalho, umidade relativa, Insolação, radiação solar global, pressão atmosférica, velocidade do vento e precipitação.

A Tabela 09 demonstra detalhadamente o percentual de dados com falhas por estação referente ao período de janeiro de 2009 a dezembro de 2018 para as variáveis utilizadas. De acordo com a Tabela, as estações que tiveram maiores percentuais foram Propriá (SE) e Brejo Grande (SE) do INMET, com 41,8% e 23,7%, para as variáveis velocidade do vento e radiação solar global, respectivamente, sendo que as demais estações não ultrapassaram o percentual de 19%, chegando algumas delas, a terem valores mínimos de 0,2% em falhas para temperatura máxima, temperatura do ponto de orvalho e precipitação, no caso das estações Piranhas (AL) e Traipú (AL) da Agritempo/EMBRAPA.

Tabela 09 – Percentual de falhas (%) correspondente a um total de 3.652 dados para as variáveis de cada estação. Temperatura máxima (Tmax), Temperatura mínima (Tmin), Temperatura do ponto de orvalho (Tdew), Umidade relativa (UR), Insolação (n), Radiação solar global (Rs), Pressão atmosférica (P), Velocidade do vento (U2) e Precipitação (Prec). Em destaque na cor cinza, o percentual do maior valor de falhas.

Estação (INMET e Agritempo/EMBRAPA)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Tdew (°C)	UR (%)	n (horas)	Rs (MJ ² dia ⁻¹)	P (hPa)	U ₂ (m.s ⁻¹)	Prec (mm.dia)
(%) de Falhas									
Arco Verde (PE)	1,6	1,6	1,7	1,6	*	1,9	1,6	9,3	2,5
Arapiraca (AL)	3,0	3,0	4,0	3,1	*	15,6	3,0	3,8	17,9
Brejo Grande (SE)	7,3	7,3	7,3	18,6	*	23,7	7,3	7,3	8,1
Pão de Açúcar (AL)	5,9	5,9	6,1	6,2	*	6,2	5,8	7,2	5,9
Piranhas (AL)	0,2	0,2	**	**	**	**	**	**	0,2
Propriá (SE)	-	0,2	-	-	0,8	-	-	41,8	-
Traipú (AL)	0,2	0,2	**	**	**	**	**	**	0,2

Fonte: Autor (2019)

*não foi utilizada a variável para essa estação

**para as estações não haviam valores para essas variáveis. Utilizou-se método de estimativa descrito na metodologia.

Importante ressaltar que as estações da Agritempo/EMBRAPA apenas dispunham de dados de temperatura máxima, mínima e precipitação, tendo sido

todas as demais variáveis estimadas de acordo com metodologia já citada anteriormente.

Todas as falhas observadas nas estações descritas na Tabela 09 foram preenchidas utilizando-se a técnica de imputação (MICE), com exceção da variável Insolação (0,8%). Essa variável somente foi utilizada nos cálculos de ETo para a estação de Propriá (SE) e, seus dados faltantes, foram substituídos por método de estimativa descrito por Hargreaves e Samani (1985) conforme Equação 08.

Após a imputação dos dados faltantes, foi escolhida da série original do período de estudo de dez anos ao menos um ano de dados sem falhas. Para todas as estações do INMET (automática e convencional) e da Agritempo/EMBRAPA, utilizou-se o ano de 2015, sendo que para a estação convencional de Propriá (SE) do INMET, foi utilizado o ano de 2014. Após a escolha do ano, falhas foram geradas aleatoriamente obedecendo o mesmo percentual de falhas equiparado à série original, a fim de comparar dados realmente observados com a imputação gerada. As medidas estatísticas usadas na avaliação do método foram o coeficiente de correlação (r) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM).

A Tabela 10 está representando valores de r e do REQM para as variáveis Temperatura máxima, Temperatura mínima, Temperatura do ponto de orvalho e Umidade relativa, onde tiveram seus dados alterados correspondente a uma amostra de N=365 dias para um ano de validação.

Tabela 10 – Valores de r (coeficiente de correlação) e do REQM Raiz do Erro Quadrático Médio) para as variáveis Temperatura máxima (Tmax), Temperatura mínima (Tmin), Temperatura do ponto de orvalho (Tdew), Umidade relativa (UR). Valores com nível de significância de 5%.

Estação	Tmax (°C)		Tmin (°C)		Tdew (°C)		UR (%)	
	r	REQM	r	REQM	r	REQM	r	REQM
Arco Verde (PE)	0,99	0,10	0,98	0,28	0,99	0,13	0,99	0,21
Arapiraca (AL)	0,99	0,14	0,99	0,13	0,99	0,09	0,99	0,40
Brejo Grande (SE)	0,98	0,22	0,98	0,34	0,99	0,13	0,96	1,29
Pão de Açúcar (AL)	0,99	0,30	0,99	0,25	0,98	0,26	0,98	1,79
Piranhas (AL)	*	*	*	*	*	*	*	*
Propriá (SE)	*	*	*	*	*	*	*	*
Traipú (AL)	*	*	*	*	*	*	*	*

Fonte: Autor (2019)

* Não houve imputação para esses dados

As estações de Arco Verde (PE), Arapiraca (AL), Brejo Grande (SE) e Pão de Açúcar (AL) tiveram valores de r acima de 0,95 para todas as variáveis, representando uma correlação forte entre valores observados e imputados.

Analisando o parâmetro REQM, ainda na Tabela 10, a variável UR apresentou maiores erros entre preenchimento e observações para as estações de Brejo Grande (SE) e Pão de Açúcar (AL) e menores erros para Arco Verde (PE) e Arapiraca (AL). As variáveis Tmax, Tmin, Tdew, tiveram os menores valores para todas as estações, com exceção de Piranhas (AL), Propriá (SE) e Traipú (AL), pois para estas não houve necessidade do teste, tendo em vista o baixo percentual de dados faltantes.

Tabela 11 – Valores de r (coeficiente de correlação) e do REQM Raíz do erro Quadrático Médio) para as variáveis Radiação solar global (Rs), Pressão atmosférica (P), Velocidade do vento (U₂) e Precipitação (Prec). Valor de r abaixo de 0,65 para velocidade do vento está destacado em cinza. Valores com nível de significância de 5%.

Estação	Rs (MJ ² dia ⁻¹)		P (hPa)		U ₂ (m.s ⁻¹)		Prec (mm.dia)	
	r	REQM	r	REQM	r	REQM	r	REQM
Arco Verde (PE)	0,98	0,93	0,99	0,02	0,91	0,27	0,99	0,03
Arapiraca (AL)	0,97	1,08	0,99	0,09	0,97	0,17	0,97	1,11
Brejo Grande (SE)	0,96	1,35	0,99	0,12	0,94	0,27	0,99	0,09
Pão de Açúcar (AL)	0,99	0,34	0,99	0,08	0,93	0,25	0,98	0,86
Piranhas (AL)	*	*	*	*	*	*	*	*
Propriá (SE)	*	*	*	*	0,62	0,71	*	*
Traipú (AL)	*	*	*	*	*	*	*	*

Fonte: Autor (2019)

* Não houve imputação para esses dados

Na Tabela 11, as variáveis Rs, P e Prec apresentaram valores de r a partir de 0,96 para todas as estações, com exceção para a variável U₂, com r a partir de 0,91 para todas as estações. Um destaque foi feito para a estação de Propriá (SE), que teve $r = 0,62$ para U₂, representando uma correlação moderada. Com esse resultado, vale uma observação para a variável vento, que demonstrou uma correlação um pouco menor em relação as demais variáveis para todas as estações, não deixando de ser considerado um resultado satisfatório.

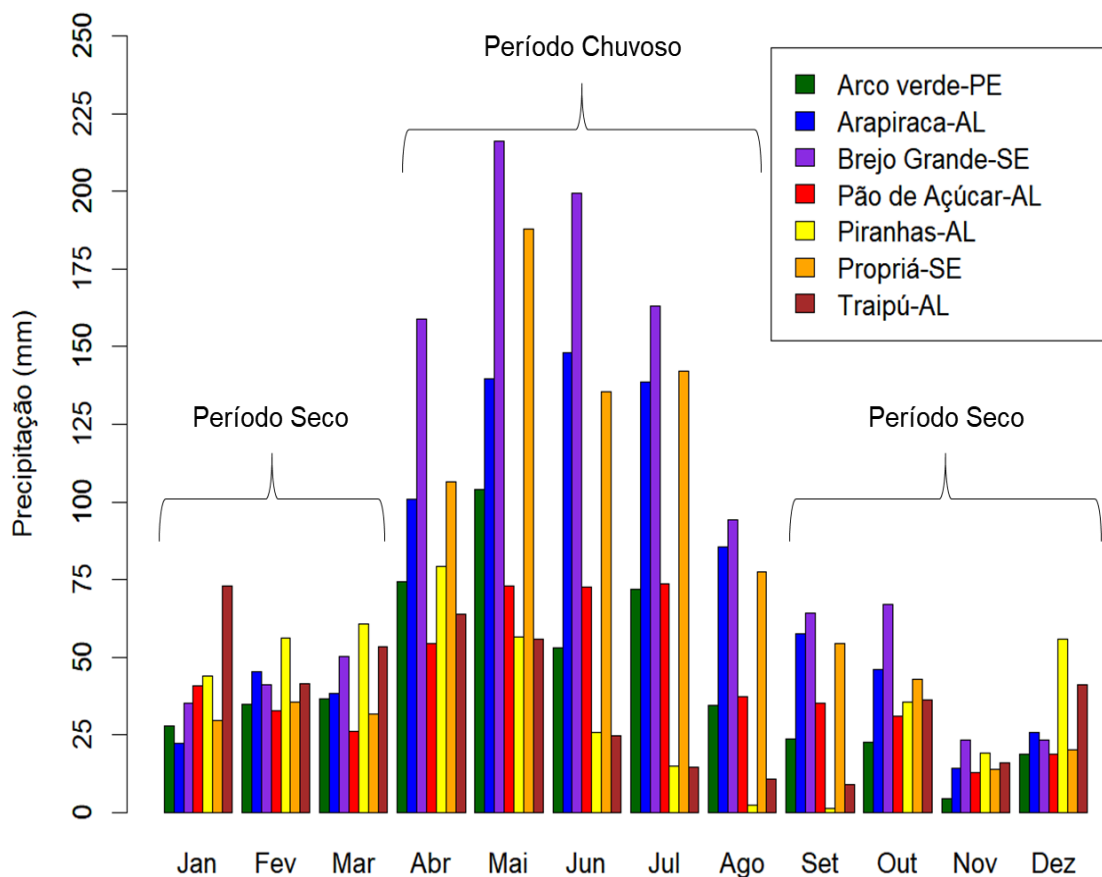
No que se refere ao REQM, os maiores erros entre preenchimento e observações ocorreram para a variável Rs das estações de Arapiraca (AL) e Brejo Grande (SE). Para as estações de Piranhas (AL), Propriá (SE) e Traipú (AL),

também não houve necessidade do teste, devido ao baixo percentual de dados com falhas, com exceção do variável vento para a estação de Propriá (SE). Em detrimento das análises realizadas, os valores de r e do REQM das estações mostraram que o método de preenchimento foi eficaz e gerou valores confiáveis, levando a aceitação dos seus resultados, complementando assim as falhas nas séries.

4.2 Análise das principais variáveis meteorológicas utilizadas no estudo

Por meio da Figura 10, observam-se as médias dos totais mensais de precipitação para Arco Verde (PE), Arapiraca (AL), Brejo Grande (SE), Pão de Açúcar (AL), Piranhas (AL), Propriá (SE) e Traipu (AL). Nota-se que o sinal sazonal da precipitação na região do baixo São Francisco é semelhante, apresentando dois períodos distintos: um chuvoso e um seco.

Figura 10 – Gráfico de barras com média do acumulado mensal da precipitação no BSF para Arco Verde (barra verde), Arapiraca (barra azul), Brejo Grande (barra violeta), Pão de Açúcar (barra vermelha), Piranhas (barra amarela), Propriá (barra laranja) e Traipú (barra marrom), para o período de 2009 a 2018.



Fonte: Autor (2019)

Apesar do comportamento sazonal apresentar similaridade entre as localidades, as ocorrências dos máximos e dos mínimos de precipitação foram relativamente diferentes. Arco Verde, Brejo Grande e Propriá tiveram seus máximos em maio (103,9 mm, 216,2 mm e 187,9 mm, respectivamente), Arapiraca teve seu máximo em junho (148,2 mm), Pão de Açúcar em julho (73,5 mm) e Piranhas em abril (79,2 mm). A estação de Traipú foi a única estação de estudo do Baixo São Francisco a apresentar seu máximo fora da quadra chuvosa, em janeiro (72,9 mm). E com relação aos menores valores de precipitação, Arco Verde, Brejo Grande, Propriá, Arapiraca e Pão de Açúcar tiveram seus mínimos em novembro (4,4 mm, 23,3 mm, 14,1 mm, 14,2 mm e 12,8 mm, respectivamente), em especial, Brejo Grande apresentou a mesma média mínima em novembro e dezembro (23,3 mm). Piranhas e Traipú apresentaram seus mínimos em setembro (1,5 mm e 9,0 mm, respectivamente).

Os maiores totais anuais médios registrados, em ordem decrescente, foram para as estações de Brejo Grande (1136,5 mm), Propriá (878,5 mm), Arapiraca (862,76 mm), Pão de Açúcar (508,5 mm), Arco Verde (506,9 mm), Piranhas (451,9 mm) e Traipú (440,9 mm). Essa diferença dos valores máximos e mínimos, está associada à variabilidade espaço/temporal dos sistemas meteorológicos atuantes na região detalhados na revisão de literatura.

O período chuvoso na região de estudo apresenta-se na Figura 10 compreendido entre abril a agosto. Para o período seco, este ocorre entre os demais meses do ano. Os meses de março e agosto podem ser considerados meses de transição entre um período e outro, ou seja, podem apresentar tanto características do período chuvoso ou seco. A proximidade do litoral favorece chuvas mais abundantes, como é o caso de Brejo Grande, que teve os maiores volumes de chuva em maio. Segundo Kousky (1979), o máximo de chuvas está ligado à maior atividade de circulação de brisa marítima que advectaria bandas de nebulosidade para o continente e à ação das frentes frias, ou seus remanescentes, que se propagam ao longo da costa. Sugeriu, ainda, que esse máximo de chuvas estaria possivelmente associado à máxima convergência dos alísios com a brisa terrestre, a qual deve ser mais forte durante as estações de outono e inverno quando o contraste de temperatura entre a terra e o mar é maior.

A distribuição espaço-temporal do período chuvoso no NEB é ocasionada por vários sistemas atmosféricos, sendo os principais responsáveis pelas chuvas a Zona

de Convergência Intertropical (ZCIT) (Hastenrath e Heller, 1977); as extremidades de Frentes Frias (Kousky, 1979); os Vórtices Ciclônicos de Ar Superior (VCAS) (Kousky e GAN, 1981). Além dos VCANs, podem ser observados Vórtices Ciclônicos de Médios Níveis (VCMN) na qual afetam muito a mudança do tempo no NEB (FEDOROVA, 2008), assim como sistemas de mesoescala (SM) como brisas terrestres (BT) e marítimas (BM) (Melo et al, 2011). Papel importante nas precipitações sobre o NEB também são atribuídos aos Anticiclones Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que transportam umidade do oceano para o continente, intensificando a instabilidade sobre o NEB como observaram Bastos e Ferreira (2000).

Na Tabela 12 estão representados os valores médios das principais variáveis meteorológicas do estudo, referente ao período de 2009-2018. Das sete localidades estudadas, as que apresentaram maiores valores de: precipitação (Brejo Grande com 216 mm.mês^{-1}), radiação solar global (Brejo Grande $20,9 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), temperatura média (Pão de Açúcar com $30,3^{\circ}\text{C}$), umidade relativa (Arapiraca com 69,7%) e velocidade do vento (Arco Verde com 2,4 m/s). As localidades com menores valores para as mesmas variáveis, respectivamente foram: Piranhas ($2,0 \text{ mm.mês}^{-1}$), Arapiraca ($12,3 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), Arco Verde ($21,7^{\circ}\text{C}$), Arco Verde (45,6%) e Pão de Açúcar (0,7 m/s). Para Santos et al. (2010) as precipitações observadas no período de maio a agosto, no Baixo São Francisco, são em geral decorrentes dos Distúrbios Ondulatórios de leste (OL), que atuam entre o Rio Grande do Norte e o norte da Bahia.

Com relação a temperatura média (Tabela 12), foi observado que a mesma apresentou um comportamento sazonal semelhante nas sete localidades das estações, onde os mínimos ocorreram no período chuvoso. Em Pão de Açúcar verificou-se a maior amplitude térmica média durante os meses do ano ($5,4^{\circ}\text{C}$), quando comparada com as demais localidades. A menor amplitude ocorreu em Brejo Grande ($2,9^{\circ}\text{C}$), sendo esta a localidade com maiores valores de Rs e volumes de precipitação. Arco Verde foi a localidade a apresentar a menor temperatura e maior valor de velocidade de vento, resultados esses que estão associados com maior altitude (684 m) em relação as demais.

Quanto aos valores de umidade relativa, as localidades de Arapiraca, Brejo Grande e Propriá apresentaram URs mais altas do BSF, o que corresponderam aos valores médios de precipitação para o período chuvoso (Figura 10). E em referência

a velocidade do vento das localidades de Piranhas e Traipu, os valores apresentados (2,0 m/s) correspondem a valores médios descritos na metodologia.

Tabela 12 – Valores médios mensais de Precipitação (mm) (Prec), Radiação solar global ($\text{MJ.m}^{-2}\text{.dia}^{-1}$) (Rs), Temperatura média ($^{\circ}\text{C}$) (Tmed), Umidade relativa (%) (UR) e Velocidade do vento (m/s) (U_2), para as estações de Arco Verde (PE), Arapiraca (AL), Brejo Grande (SE), Pão de Açúcar (AL), Piranhas (AL), Propriá (SE) e Traipú (AL), referente ao período de 2009 a 2018. Maiores valores médios em cor cinza e menores valores em cor amarela.

Estações	Var	Meses											
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Arco Verde (PE)	Prec	28	35	37	75	104	53	72	34	24	23	4	19
	Rs	17,4	15,8	18,6	16,1	14,1	12,5	13,4	15,9	17,8	18,8	18,3	17,5
	Tmed	26,2	26,0	26,3	25,5	23,9	22,6	21,7	22,2	23,7	25,4	26,4	26,5
	UR	51,4	49,0	53,7	56,1	63,3	62,7	66,1	61,3	53,9	51,6	45,6	48,3
	U_2	2,1	1,9	1,9	1,9	2,0	2,0	2,3	2,3	2,3	2,4	2,3	2,2
Arapiraca (AL)	Prec	22	45	38	101	140	148	139	85	58	46	14	26
	Rs	18,7	16,2	18,5	15,6	13,8	12,3	12,5	14,6	16,2	18,6	19,5	19,4
	Tmed	27,2	27,3	27,5	26,8	25,4	24,2	23,1	23,2	24,2	25,7	26,7	27,3
	UR	58,1	54,0	59,0	60,7	68,2	67,2	69,7	67,1	62,1	60,4	55,4	56,4
	U_2	1,8	1,5	1,5	1,2	1,2	1,1	1,0	1,2	1,4	1,8	2,0	1,9
Brejo Grande (SE)	Prec	35	41	50	159	216	199	163	94	64	67	23	23
	Rs	20,4	18,0	19,8	16,8	14,5	13,7	14,6	16,3	18,0	20,0	20,7	20,9
	Tmed	27,7	27,9	28,0	27,5	26,6	25,9	25,2	25,1	25,5	26,4	27,1	27,6
	UR	62,3	57,2	63,5	63,9	68,9	66,6	67,2	65,7	62,6	63,9	61,0	62,7
	U_2	1,3	1,0	1,0	0,8	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3	1,5	1,5
Pão de Açúcar (AL)	Prec	41	33	26	54	73	73	74	37	35	31	13	19
	Rs	19,9	17,2	19,8	16,7	14,5	13,2	13,5	16,1	17,5	19,5	19,8	19,9
	Tmed	29,9	30,0	30,3	29,2	27,4	26,1	24,9	25,2	26,5	28,3	29,6	30,0
	UR	51,2	47,5	52,2	55,6	64,0	63,8	67,4	63,4	57,4	54,6	48,3	49,4
	U_2	1,4	1,2	1,3	1,0	0,8	0,7	0,8	0,9	1,1	1,3	1,5	1,4
Piranhas (AL)	Prec	44	56	61	79	56	26	15	2	2	36	19	56
	Rs	14,8	14,5	17,1	16,5	16,4	15,5	15,8	16,1	15,2	14,5	13,2	13,6
	Tmed	28,2	28,4	28,7	27,4	25,9	24,6	23,7	24,1	25,2	27,0	28,2	28,3
	UR	54,0	49,7	54,6	53,4	56,3	55,1	57,2	55,6	52,1	53,2	51,4	53,9
	U_2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Propriá (SE)	Prec	30	36	32	107	188	136	142	77	54	43	14	20
	Rs	16,3	15,9	19,5	18,0	17,2	16,7	16,5	17,2	15,1	14,2	14,1	14,6
	Tmed	28,4	28,4	28,9	28,1	26,6	25,5	24,5	24,6	25,4	27,0	27,9	28,5
	UR	56,1	52,7	57,1	59,5	67,2	66,9	69,4	67,1	62,9	61,3	56,3	57,7
	U_2	1,9	1,7	1,8	1,5	1,4	1,3	1,4	1,4	1,6	1,8	1,9	2,1
Traipú (AL)	Prec	73	42	54	64	56	25	15	11	9	36	16	41
	Rs	14,4	14,3	17,3	16,9	16,8	16,0	16,1	16,1	14,9	14,3	13,0	13,4
	Tmed	28,0	28,2	28,6	27,4	25,8	24,6	23,7	23,9	24,8	26,4	27,6	28,0
	UR	54,7	50,3	54,2	52,7	55,6	54,2	56,7	55,6	52,7	53,7	51,8	54,2
	U_2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

Fonte: Autor (2019)

4.3 Análise da Evaporação (E) pelo método de Penman (1948)

4.3.1 Análise diária e mensal da Evaporação (E)

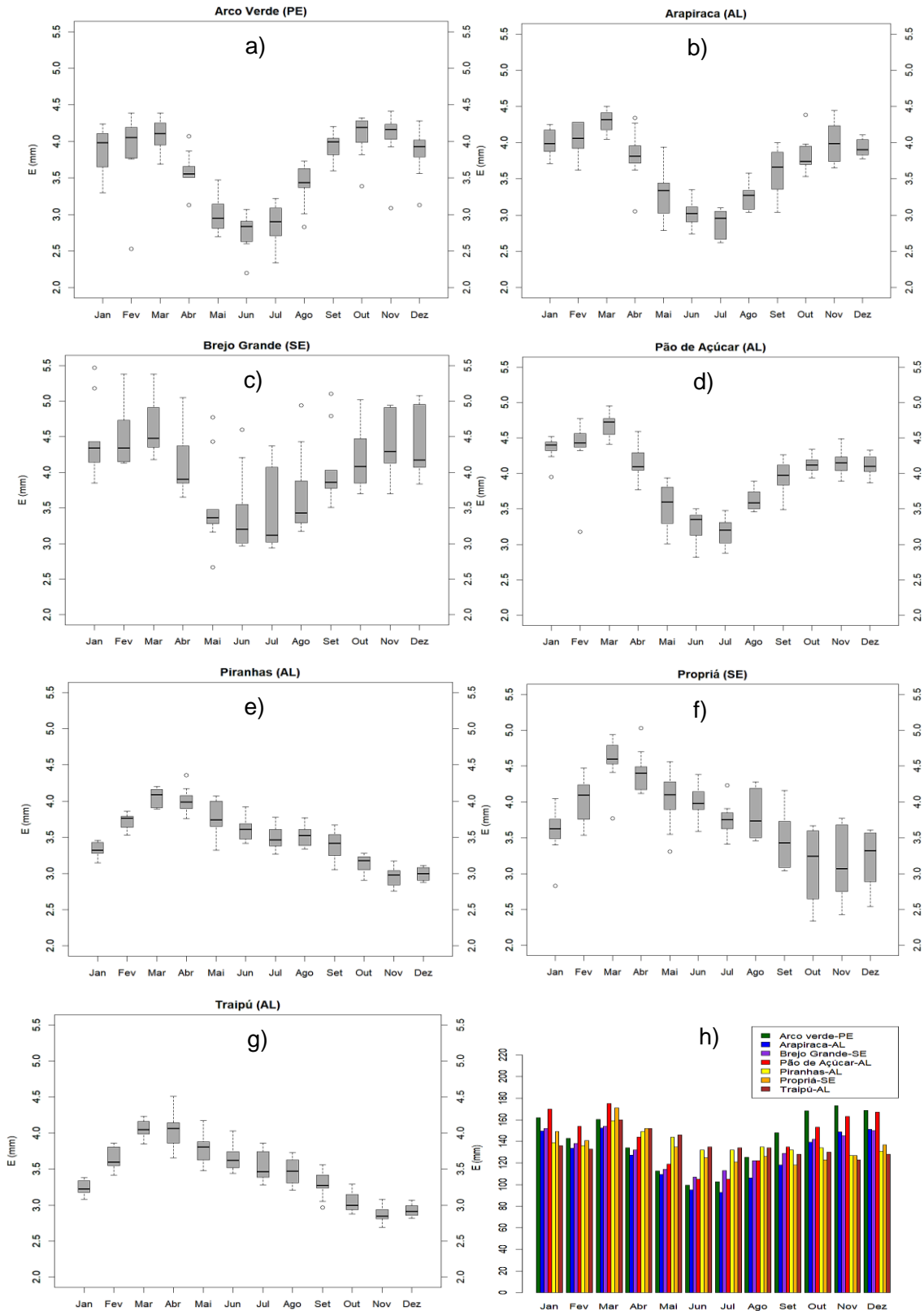
Para os resultados de Evaporação do Baixo São Francisco, no período de 2009 a 2018, utilizou-se o diagrama de caixa “boxplot” que forneceu uma análise visual da posição e simetria dos dados. Um padrão parece ser comum na região de estudo de acordo com a Figura 11.

A (E) teve seus valores mínimos durante o período chuvoso, nas estações meteorológicas das cidades de Arco Verde (2,20 mm.dia⁻¹) e Pão de Açúcar (2,82 mm.dia⁻¹) em junho, Arapiraca (2,62 mm.dia⁻¹) em julho, Brejo Grande (2,67 mm.dia⁻¹) em maio (Figura 11). Esse resultado diferiu das demais cidades de Piranhas (2,76 mm.dia⁻¹), Propriá (2,34 mm.dia⁻¹) e Traipú (2,69 mm.dia⁻¹), que apresentaram seus mínimos na estação seca, nos meses de novembro, outubro e novembro, respectivamente.

Com relação aos valores máximos de evaporação (mm.dia⁻¹), os picos ocorreram no mês de novembro para Arco Verde (4,41 mm.dia⁻¹), janeiro para Brejo Grande (5,47 mm.dia⁻¹) e março para Arapiraca (4,50 mm.dia⁻¹) e Pão de Açúcar (4,95 mm.dia⁻¹), nesses últimos, especificamente na transição para o início do período chuvoso. Já para as demais estações, os máximos ocorreram no mês de abril: Piranhas (4,36 mm.dia⁻¹), Propriá (5,03 mm.dia⁻¹) e Traipú (4,51 mm.dia⁻¹). A Evaporação mais baixa na região de estudo é observada durante a maior parte no período chuvoso (abril a julho) associada às temperaturas mais baixas e ao ar mais úmido no inverno (Tabela 12), umidade esta que advém do Oceano Atlântico, ocasionando chuvas no leste da Região Nordeste, especialmente nos Estados da Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e parte da Bahia.

Com relação aos valores de acumulado médio mensal de evaporação (Figura 11h), para o período de estudo, Arco verde apresentou o menor valor (82,79 mm) no mês de junho e Pão de Açúcar teve o maior valor dentre as demais (145,01 mm) em março. Comparando esses resultados com a média climatológica do INMET (2019) (resultados com base no Evaporímetro de Piché), referente ao período de 1961-1990, Arco Verde teve no mesmo mês resultado bem semelhante (80,9 mm) e Pão de Açúcar apresentou (160,8 mm), podendo essa diferença estar relacionado ao período.

Figura 11 – Boxplot da média diária ($\text{mm}/\text{dia}^{-1}$) da Evaporação (E), nos doze meses do ano, para as estações de Arco Verde (a), Arapiraca (b), Brejo Grande (c), Pão de Açúcar (d), Piranhas (e), Traipú (f) e Propriá (g). Gráfico de barras do acumulado médio mensal (h) para o período de 2009 a 2018



Fonte: Autor (2019)

Os valores mínimos e máximos observados durante o ciclo anual na região de estudo podem ser vistos na Tabela 12, na qual são mostradas algumas estatísticas descritivas tais como: Média, Desvio Padrão (DP) e Coeficiente de Variação (CV) referente ao período de 2009 a 2018.

De acordo com os dados da Tabela 13, foi observado que o valor médio diário de (E) para Brejo Grande, no período de estudo, foi maior quando comparado às demais localidades ($4,06 \text{ mm.dia}^{-1}$), com valores oscilando entre $3,40$ a $4,66 \text{ mm.dia}^{-1}$. Em Traipú, que apresentou o menor valor ($3,46 \text{ mm.dia}^{-1}$), a variação foi de $2,87$ a $4,06 \text{ mm.dia}^{-1}$. Sendo Pão de Açúcar a localidade que apresentou maior amplitude ($1,50 \text{ mm.dia}^{-1}$) e Piranhas a menor amplitude ($1,09 \text{ mm.dia}^{-1}$) de (E) dentre as localidades estudadas. A maior amplitude de (E) de Pão de Açúcar coincide com maior amplitude de temperatura ($5,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$), conforme verificado na Tabela 11. Os valores médios diários de (E) corroboraram com a maior parte dos resultados apresentados na Figura 03, referente aos valores médios de evaporação do INMET.

Quanto à dispersão dos dados, dispostos na Tabela 13, observou-se que Brejo Grande apresentou maior dispersão quando comparada às demais estações, principalmente, nos meses da estação chuvosa ($\sim 16,0\%$). Numa média anual Piranhas ($\sim 4,0\%$) e Traipú ($\sim 4,5\%$) apresentaram menores dispersões, sendo que seguida à Brejo Grande ($\sim 12,8\%$), foi maior para as estações de Propriá ($\sim 9,51\%$), Arco Verde ($\sim 8,0\%$) e Arapiraca ($\sim 6,2\%$). Essa maior e menor dispersão é bem visível nos diagramas de caixa da Figura 12. Pode-se considerar então, que de um modo geral a E na região de estudo apresenta baixa dispersão com relação à média, indicando que este parâmetro (a média) é um bom estimador para representar a E.

A estação de Brejo Grande (SE) teve a maior média anual acumulada de (E) da série de dez anos, correspondendo à $1482,67 \text{ mm}$ conforme Tabela 12. A estação de Traipú (AL) aparece com a menor média acumulada do Baixo São Francisco com o valor de $1264,29 \text{ mm}$, tendo valores de (E) média diária do período, correspondendo à $4,06 \text{ mm}$ (maior do grupo) e $3,46 \text{ mm}$ (menor do grupo), respectivamente. Todos esses valores podem ser observados e comparados com outras localidades na Tabela 13.

Mas, especificamente para esses últimos resultados relativos ao acumulado médio de (E), o boletim técnico mensal do INMET de abril de 2010 traz relatos sobre os eventos meteorológicos ocorridos naquele ano e que corroboram com os resultados do trabalho.

Tabela 13 – Estatística descritiva para o período de 2009 a 2018, referente aos valores médios mensais de Evaporação (E) das Estações de Arco Verde (PE), Arapiraca (AL), Brejo Grande (SE), Pão de Açúcar (AL), Piranhas (AL), Propriá (SE) e Traipú (AL). *DP e CV.

Mês	Arco Verde (PE)				Arapiraca (AL)				Brejo Grande (SE)			
	Média (mm.dia ⁻¹)	DP (mm)	CV (%)	E (mm.mês ⁻¹)	Média (mm.dia ⁻¹)	DP (mm)	CV (%)	E (mm.mês ⁻¹)	Média (mm.dia ⁻¹)	DP (mm)	CV (%)	E (mm.mês ⁻¹)
Jan	3,88	0,32	8,1	120,34	4,02	0,18	4,4	124,45	4,45	0,50	11,2	137,83
Fev	3,89	0,52	13,4	109,64	4,05	0,22	5,3	114,16	4,51	0,45	10,0	127,28
Mar	4,09	0,21	5,1	126,66	4,31	0,15	3,5	133,40	4,66	0,43	9,3	144,39
Abr	3,60	0,25	6,8	107,90	3,83	0,36	9,3	114,84	4,15	0,50	12,0	124,46
Mai	3,01	0,25	8,2	93,29	3,29	0,34	10,3	102,08	3,53	0,61	17,4	109,33
Jun	2,76	0,25	9,0	82,79	3,01	0,19	6,1	90,36	3,40	0,56	16,6	102,02
Jul	2,87	0,25	8,8	88,87	2,90	0,18	6,3	89,82	3,42	0,60	17,4	105,95
Ago	3,41	0,29	8,3	105,59	3,26	0,18	5,5	100,95	3,67	0,58	15,9	113,92
Set	3,94	0,18	4,6	118,22	3,60	0,32	8,8	107,93	4,03	0,51	12,6	120,89
Out	4,08	0,29	7,0	126,57	3,83	0,23	6,1	118,64	4,21	0,47	11,2	130,34
Nov	4,07	0,37	9,1	122,10	4,00	0,27	6,7	120,10	4,36	0,44	10,0	130,93
Dez	3,86	0,32	8,3	119,59	3,93	0,12	2,9	121,92	4,37	0,47	10,8	135,34
Média	3,62	T. Anual		1321,55	3,67	T. Anual		1338,66	4,06	T. Anual		1482,67

Mês	Pão de Açúcar (AL)				Piranhas (AL)			
	Média (mm.dia ⁻¹)	DP (mm)	C.V (%)	E (mm.mês ⁻¹)	Média (mm.dia ⁻¹)	DP (mm)	C.V (%)	E (mm.mês ⁻¹)
Jan	4,35	0,16	3,7	134,81	3,33	0,10	3,0	103,21
Fev	4,37	0,44	10,0	123,17	3,73	0,12	3,1	105,09
Mar	4,68	0,17	3,5	145,01	4,06	0,12	2,9	125,69
Abr	4,16	0,24	5,8	124,87	4,00	0,18	4,4	119,92
Mai	3,53	0,32	9,0	109,27	3,77	0,23	6,0	116,83
Jun	3,27	0,22	6,6	98,05	3,61	0,14	3,9	108,31
Jul	3,18	0,18	5,7	98,42	3,50	0,16	4,5	108,35
Ago	3,63	0,15	4,0	112,42	3,51	0,14	3,8	108,92
Set	3,94	0,24	6,1	118,25	3,39	0,20	5,8	101,78
Out	4,12	0,12	2,8	127,69	3,14	0,11	3,6	97,45
Nov	4,14	0,18	4,2	124,30	2,97	0,13	4,5	89,09
Dez	4,11	0,14	3,3	127,47	2,99	0,09	2,8	92,79
Média	3,96	T. Anual		1443,74	3,50	T. Anual		1277,42

Mês	Propriá (SE)				Traipú (AL)			
	Média (mm.dia ⁻¹)	DP (mm)	C.V (%)	E (mm.mês ⁻¹)	Média (mm.dia ⁻¹)	DP (mm)	C.V (%)	E (mm.mês ⁻¹)
Jan	3,61	0,35	9,6	111,87	3,24	0,10	3,1	100,37
Fev	4,03	0,30	7,3	113,67	3,64	0,15	4,0	102,61
Mar	4,57	0,32	7,0	141,74	4,06	0,13	3,2	125,81
Abr	4,42	0,28	6,3	132,52	4,03	0,24	5,8	121,00
Mai	4,05	0,39	9,5	125,53	3,80	0,21	5,5	117,91
Jun	3,99	0,23	5,8	119,79	3,67	0,19	5,1	109,95
Jul	3,76	0,22	5,8	116,54	3,53	0,21	5,9	109,28
Ago	3,82	0,32	8,3	118,40	3,47	0,19	5,3	107,63
Set	3,46	0,40	11,5	103,73	3,29	0,18	5,5	98,56
Out	3,14	0,51	16,2	97,36	3,04	0,13	4,4	94,32
Nov	3,14	0,49	15,5	94,18	2,87	0,11	3,7	86,15
Dez	3,22	0,39	12,1	99,68	2,93	0,08	2,7	90,72
Média	3,77	T. Anual		1374,99	3,46	T. Anual		1264,29

*Desvio Padrão (DP) e Coeficiente de Variação (CV). Fonte: Autor (2019)

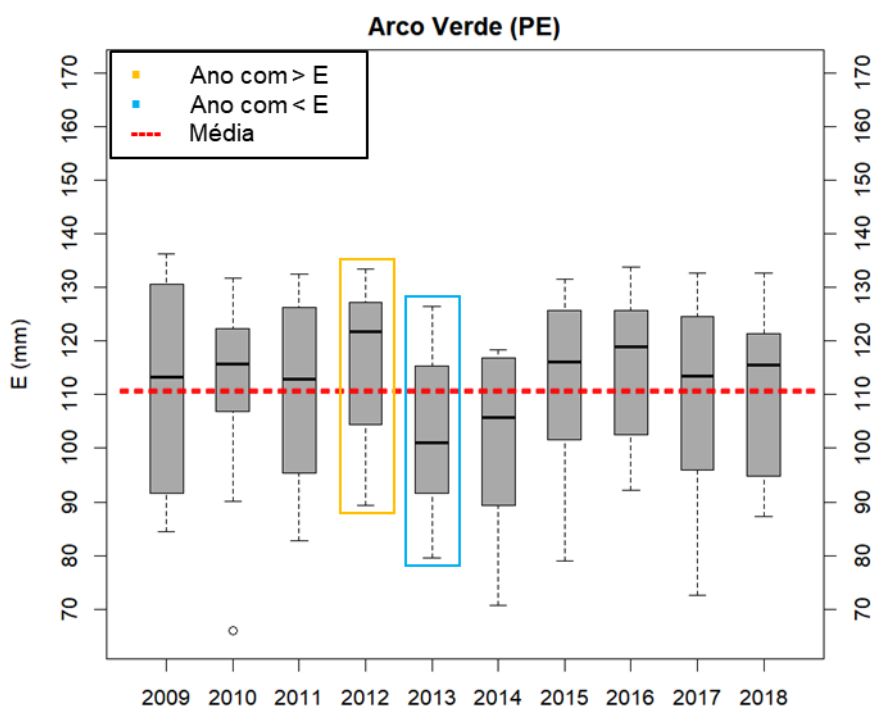
O resultado de Brejo Grande, em especial, pode estar relacionado aos eventos meteorológicos citados anteriormente, onde teve maiores volumes de chuvas, que ocorreram na localidade no ano de 2010, comprovados pela média do período dos últimos dez anos na Figura 10, informados em abril de 2010 pelo INMET, onde para aquele mês, sistemas frontais, favoreceram a formação de áreas de instabilidade que foram responsáveis pelos volumes de chuva acima da normalidade no litoral, centro e norte da Bahia, Sergipe, oeste de Alagoas, centro e oeste de Pernambuco e sul do Ceará. Em algumas ocasiões, essas áreas de instabilidade provocaram eventos de tempo severo. Também conforme boletim, nesse mês, a distribuição das chuvas na região nordeste foi fortemente influenciada pela atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) durante vários dias do mês, juntamente com a passagem de uma frente fria que determinou as condições do tempo em diversos estados da região (INMET, 2010).

4.3.2 Análise Interanual da Evaporação em relação as sub-bacias do Baixo São Francisco.

A análise interanual da Evaporação na sub-bacia do Alto Ipanema no BSF, pela localidade de Arco Verde (PE) está representada na Figura 12, com valores totais anuais médios de Evaporação (E) em mm.mês^{-1} , referente ao período de 2009 a 2018. O maior valor médio observado do período foi $115,9 \text{ mm.mês}^{-1}$ em 2012 e seu mínimo foi de $102,5 \text{ mm.mês}^{-1}$ em 2013, tendo sua média dos dez anos um valor de $110,1 \text{ mm.mês}^{-1}$. Para esta localidade, os anos de maiores demandas hídricas foram 2012, 2015 e 2016, ambos acima da média do período, estando apenas os anos de 2011, 2013, 2014 abaixo da média.

Segundo Marengo et al. (2016) a seca que se intensificou em 2012 e ampliou em 2015 foi considerada a mais grave das últimas décadas nas regiões semiáridas do Nordeste Brasileiro (NEB). O autor do estudo relata ainda que os primeiros sinais de seca começaram em 2010, e que somente 2011 teve chuvas acima da média, mas este foi seguido pelos déficits de precipitação mais graves em 2012. Essa informação está evidente no resultado da Figura 12, onde nos últimos dez anos o ano de 2012 apresentou maior evaporação, e por consequência da diminuição dos volumes de precipitação, em 2013 a evaporação teve o seu menor valor.

Figura 12 – Boxplot da variação do total anual médio de Evaporação (E) (mm.mês^{-1}), observada na estação meteorológica do município de Arco Verde, representante da Sub-bacia do Alto Ipanema, para o período de 2009 a 2018.



Fonte: Autor (2019)

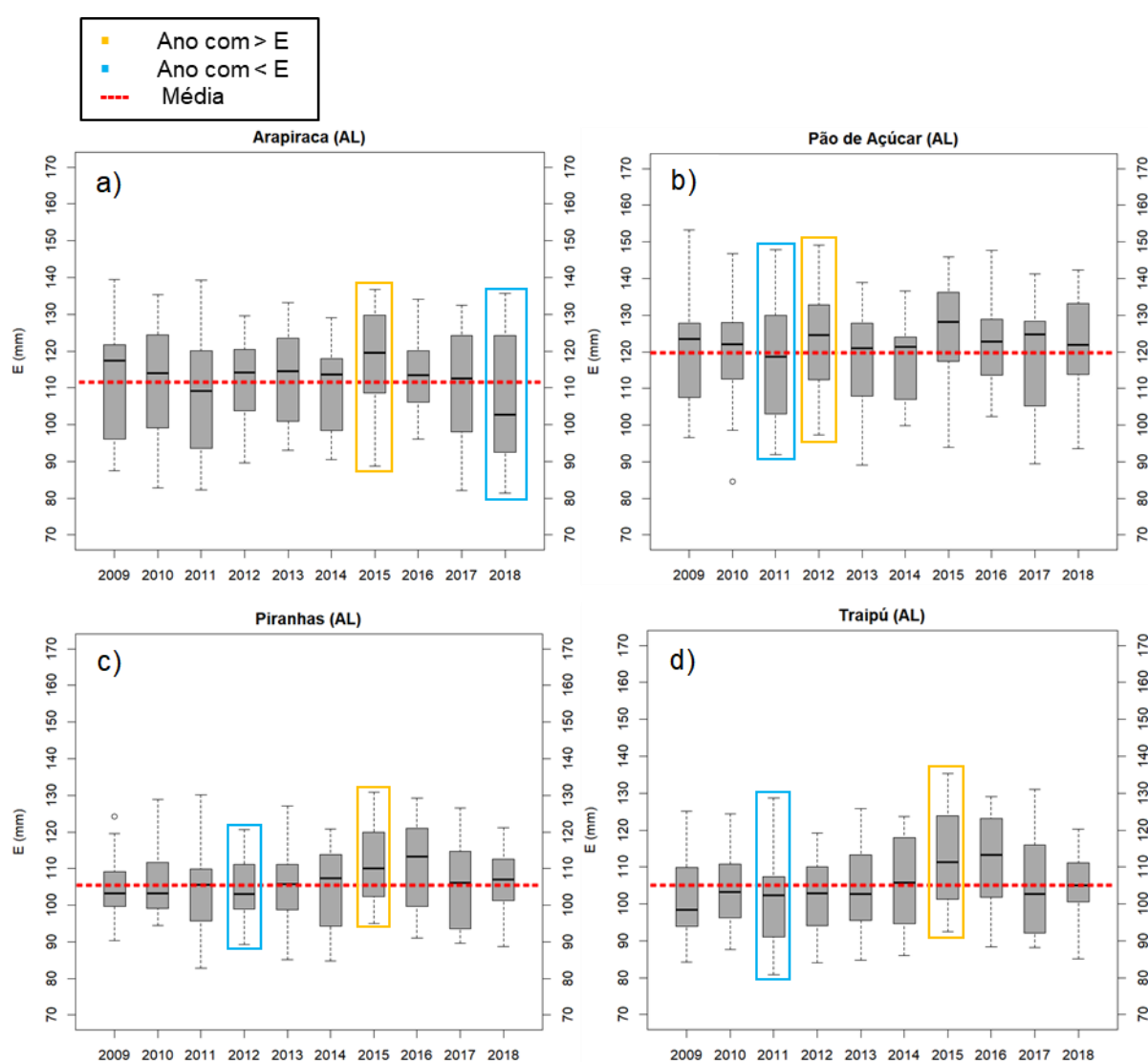
Quanto a dispersão dos dados, os anos de 2009 e 2011 apresentaram maior variabilidade, sendo que os mesmos também tiveram a sua média e mediana mais próxima da média do período. O ano de 2010 teve a menor variabilidade dentre todos, apesar de que sua média e mediana estiveram acima da média do período.

Na Figura 13 estão representadas as médias do período de estudo para as localidades pertencentes a Sub-bacia do Baixo São Francisco (AL). As médias encontradas foram: Arapiraca ($111,5 \text{ mm.mês}^{-1}$), Pão de Açúcar ($120,3 \text{ mm.mês}^{-1}$), Piranhas ($106,4 \text{ mm.mês}^{-1}$) e Traipú ($105,3 \text{ mm.mês}^{-1}$). Os anos que apresentaram maiores valores dos totais anuais médios de evaporação na região foram 2012 para Pão de Açúcar ($124,7 \text{ mm.mês}^{-1}$) e, no ano de 2015 para Arapiraca ($116,8 \text{ mm.mês}^{-1}$), Traipú ($112,5 \text{ mm.mês}^{-1}$) e Piranhas ($111,1 \text{ mm.mês}^{-1}$). Os menores valores foram nos anos 2011 para Traipú ($101,6 \text{ mm.mês}^{-1}$) e Pão de Açúcar ($117,4 \text{ mm.mês}^{-1}$), 2012 para Piranhas ($104,3 \text{ mm.mês}^{-1}$), e 2018 para Arapiraca ($108,0 \text{ mm.mês}^{-1}$). Para a região a maior demanda hídrica ocorreu no município de Pão de Açúcar em 2012 e a menor em Traipú em 2011.

Os resultados para a sub-bacia do Baixo São Francisco (AL) demonstraram uma variação dos maiores e menores valores de (E) dentre as localidades, não

seguindo um padrão. Mesmo não ocorrendo os maiores valores de (E) em 2012 para todas as estações, os mesmos ocorreram no intervalo do período de seca 2010-15 descrito por Marengo et al. (2016). Ainda na Figura 13, a dispersão dos dados mostrou que Arapiraca apresentou em 2018, maior variabilidade na (E) e Piranhas e Traipú tiveram nos anos de 2009 e 2018, respectivamente, uma menor.

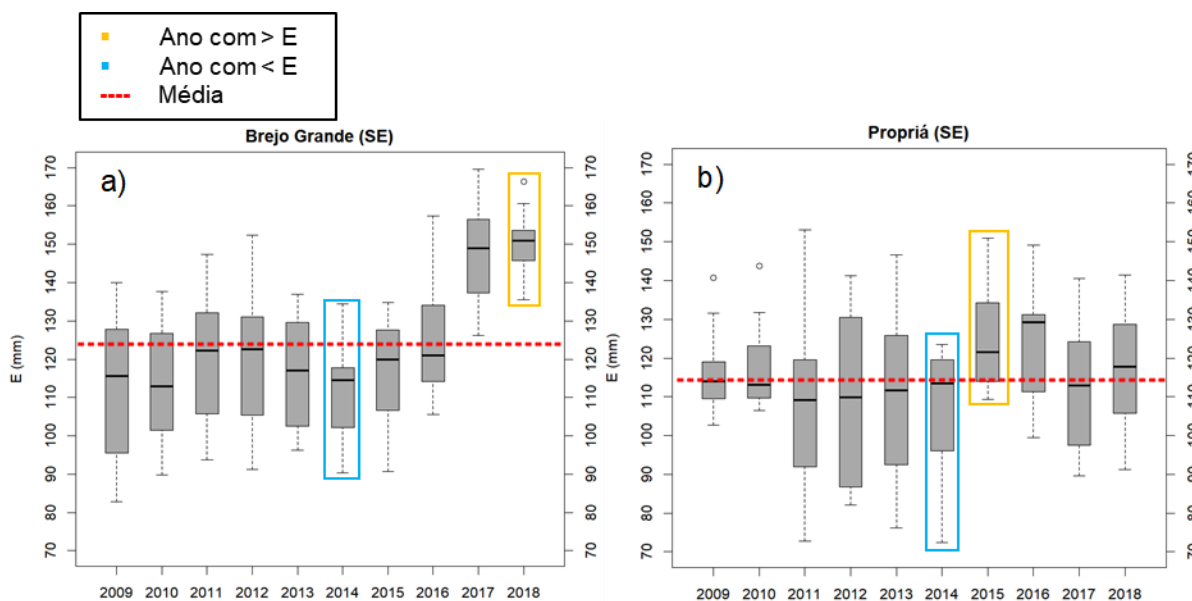
Figura 13 – Boxplot da variação do total anual médio da Evaporação (E) (mm.mês^{-1}) observada nas estações meteorológicas dos municípios de Arapiraca (a), Pão de Açúcar (b), Piranhas (c) e Traipú (d), representantes da Sub-bacia do Baixo São Francisco (AL), para o período de 2009 a 2018.



Fonte: Autor (2019)

Para a Sub-bacia do Baixo São Francisco (SE) (Figura 14), as localidades de Brejo Grande e Propriá, apresentaram como médias para os dez anos de estudo 123,5 e 114,5 mm.mês⁻¹, respectivamente.

Figura 14 – Boxplot da variação da média anual da Evaporação (E) (mm.mês⁻¹) observada nas estações meteorológicas dos municípios de Brejo grande (a) e Propriá (b), representantes da Sub-bacia do Baixo São Francisco (SE), para o período de 2009 a 2018.



Fonte: Autor (2019)

As duas localidades alcançaram maiores e menores totais anuais médios respectivamente no ano de 2018 (150,1 e 112,3 mm.mês⁻¹) em Brejo Grande e no ano de 2015 (125,2 e 107,2 mm.mês⁻¹) em Propriá. A maior demanda hídrica ocorreu em 2018 na localidade de Brejo Grande. Quanto a dispersão dos dados Propriá apresentou em 2012 maior variabilidade e Brejo Grande a menor em 2018.

Uma observação importante sobre as informações da Figura 14 é que, dentre as estações do Baixo São Francisco (SE) estudadas, apenas Brejo Grande apresentou nos anos de 2017 e 2018, seus valores de evaporação acima da média do período. Esse resultado pode estar relacionado aos maiores volumes de chuva que a localidade apresentou comparado com as outras do BSF, de acordo com a Figura 10. Outro fator a se considerar é a proximidade com o rio, ou seja, a disponibilidade de água na atmosfera, bem como o efeito de brisas com a aproximação do Oceano Atlântico. As brisas marítimas e terrestres resultam do aquecimento e resfriamento diferenciais que se estabelecem entre a terra e a água (Fedorova, 2001).

4.4 Análise da Evapotranspiração de referência (ET_o) e real (ET_r)

4.4.1 Evapotranspiração de referência (ET_o): método de Penman Monteith (FAO)

4.4.1.1 Análise diária e mensal da Evapotranspiração referência (ET_o)

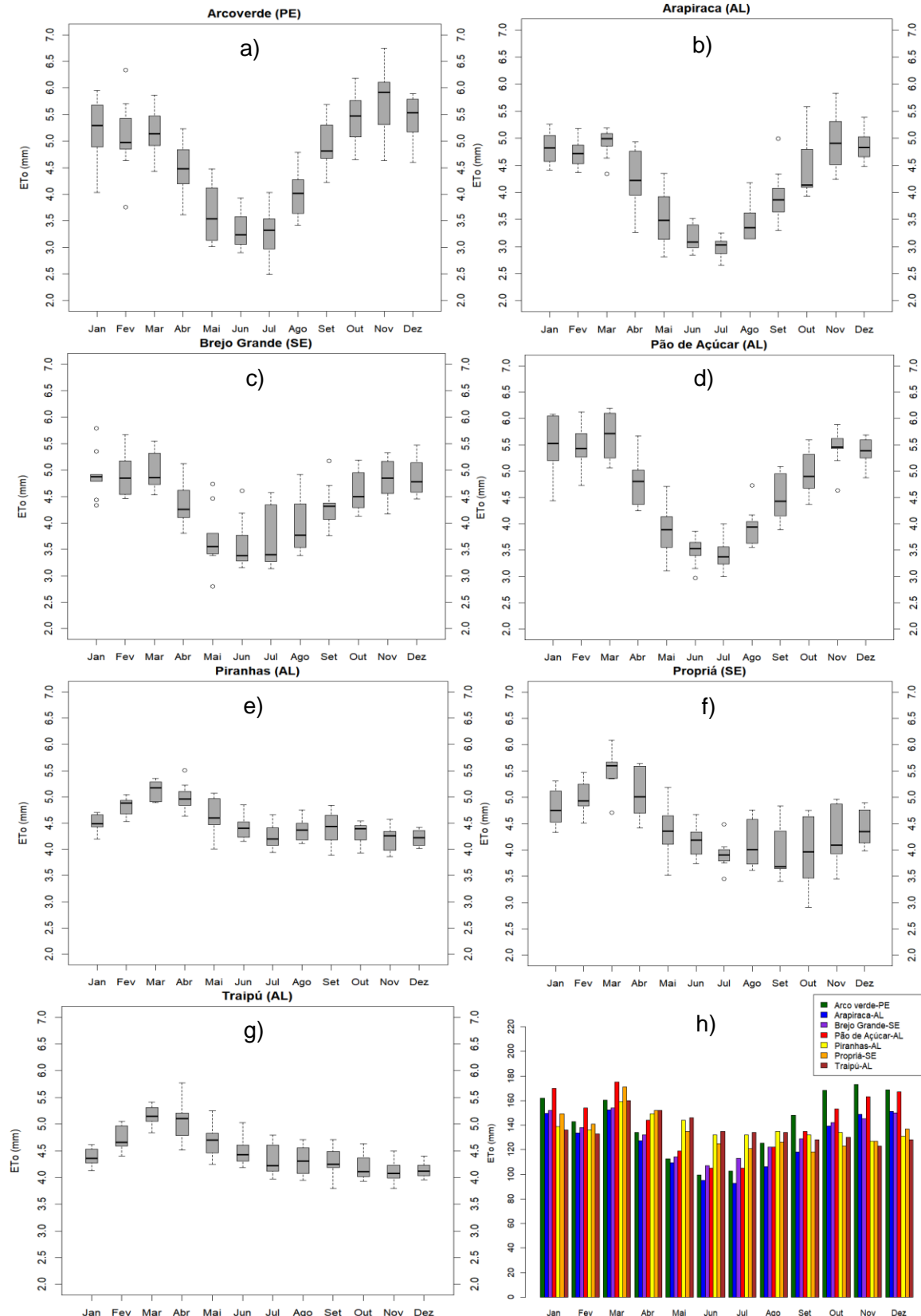
Os resultados de Evapotranspiração de referência (ET_o) do Baixo São Francisco no período de 2009 a 2018, através de diagrama de caixa “boxplot” (Figura 15) forneceu uma análise visual da posição e simetria dos dados num ciclo de doze meses. Comparando a ET_o com os resultados de (E), observou-se forte similaridade com o aspecto sazonal. A ET_o apresentou seus valores mínimos durante o período chuvoso, para as estações meteorológicas das cidades de Arco Verde (2,49 mm dia⁻¹), Arapiraca (2,65 mm dia⁻¹), Brejo Grande (2,80 mm.dia⁻¹) e Pão de Açúcar (2,97 mm.dia⁻¹) (Figura 15), nos meses de julho (Arco Verde e Arapiraca), maio (Brejo Grande) e junho (Pão de Açúcar).

Esse resultado, assim como para a (E) (Figura 11), também diferiu das demais cidades de Piranhas (3,86 mm.dia⁻¹), Propriá (2,91 mm.dia⁻¹) e Traipú (3,79 mm.dia⁻¹), que apresentaram seus mínimos na estação seca, nos meses de novembro, outubro, e setembro/novembro, respectivamente. Com relação aos valores máximos de ET_o, os picos ocorreram no mês de novembro para Arco Verde (6,75 mm.dia⁻¹) e Arapiraca (5,83 mm.dia⁻¹), em janeiro para Brejo Grande (5,79 mm.dia⁻¹) e em março para Pão de Açúcar (6,19 mm.dia⁻¹). Já para as demais estações, os máximos ocorreram no mês de abril para Piranhas (5,51 mm.dia⁻¹) e Traipú (5,77 mm.dia⁻¹), em março para Propriá (6,09 mm.dia⁻¹).

A Evapotranspiração também é observada na maior parte da região de estudo igualmente a Evaporação, durante o período chuvoso (abril a julho) que também está associada às temperaturas mais baixas e ao ar mais úmido no inverno (Tabela 11).

Com relação aos valores de acumulado médio mensal de ET_o (Figura 15h), para o período de estudo, Arapiraca apresentou o menor valor (92,5 mm) no mês de julho e Pão de Açúcar teve o maior valor dentre as demais (175,0 mm) no mês de março, este último tendo apresentado período igual à Evaporação.

Figura 15 – Boxplot média diária (mm.dia⁻¹) da Evapotranspiração de referência (ET_o) para as estações de Arco Verde (a), Arapiraca (b), Brejo Grande (c), Pão de Açúcar (d), Piranhas (e), Traipú (f) e Propriá (g). Gráfico de barras do acumulado médio mensal (h) para o período de 2009 a 2018.



Fonte: Autor (2019)

Em estudos de Barros *et al* (2017), a Evapotranspiração de referência no perímetro irrigado Jacaré-Curitiba, na cidade de Canindé-SE, segundo dados do modelo de Penman-Monteith (PM), atinge uma média diária de (ET_o) de 5,81 mm.dia⁻¹. Este estudo foi um dos poucos encontrados para a região do Baixo São Francisco durante a realização desta pesquisa.

Os valores mínimos e máximos observados para ET_o durante o ciclo anual na região do Baixo São Francisco, podem ser vistos na Tabela 13, na qual são mostradas algumas estatísticas descritivas tais como: Média, Desvio Padrão (DP) e Coeficiente de Variação (CV) referente ao período de 2009 a 2018.

De acordo com os dados da Tabela 14, nota-se que o valor médio diário de ET_o para Pão de Açúcar, no período de estudo, foi maior quando comparado com às demais localidades (4,69 mm.dia⁻¹), com valores oscilando entre 3,38 a 5,66 mm.dia⁻¹. Em Arapiraca, que apresentou o menor valor (4,18 mm.dia⁻¹), a variação foi de 2,98 a 4,96 mm.dia⁻¹. Sendo Arco verde a localidade que apresentou maior amplitude (2,46 mm.dia⁻¹) e Piranhas a menor amplitude (0,91 mm.dia⁻¹) de ET_o dentre as localidades estudadas. Resultados semelhantes para Arapiraca foram encontrados nos estudos de SILVA *et al.* (2015), onde a média de ET_o método PM-FAO foi de 4,25 mm.dia⁻¹ para o período de 2014/2015. É importante destacar que o fato de Arco Verde apresentar maior amplitude de ET_o pode estar associado a localidade estar a uma altitude de 684 m e, ter apresentado valores médios de menor temperatura e maior velocidade de vento dentre as localidades da região de estudo, conforme Tabela 12.

Quanto à dispersão dos dados observada por meio dos valores de Desvio Padrão (D.P) e Coeficiente de Variação (CV) (Tabela 13), relacionadas a Evapotranspiração de referência (ET_o), nota-se que Arco Verde (PE) apresentou maior variabilidade quando comparada às demais estações, principalmente, nos meses do período chuvoso (~12,2%). Piranhas (AL) apresentou menor dispersão (~4,8%), sendo que seguida à Arco Verde (PE) (~10,7%), tiveram maiores variabilidades as estações de Brejo Grande (SE) (~10,1%), Arapiraca (AL) (~9,0%) e Propriá (SE) (~9,4%). Pode-se considerar então, que de um modo geral a ET_o na região de estudo apresenta dispersão dos dados de moderada a baixa com relação à média, também demonstrando ser a média um bom indicador para representar a ET_o.

Tabela 14 – Estatística descritiva período de 2009 a 2018, dos valores médios mensais de Evapotranspiração de referência (ETo) das Estações de Arco Verde (PE), Arapiraca (AL), Brejo Grande (SE), Pão de Açúcar (AL), Piranhas (AL), Propriá (SE) e Traipú (AL).

Mês	Arco Verde (PE)				Arapiraca (AL)				Brejo Grande (SE)			
	Média (mm.dia ⁻¹)	DP (mm)	CV (%)	ETo (mm.mês ⁻¹)	Média (mm.dia ⁻¹)	DP (mm)	CV (%)	ETo (mm.mês ⁻¹)	Média (mm.dia ⁻¹)	DP (mm)	CV (%)	ETo (mm.mês ⁻¹)
Jan	5,22	0,59	11,3	161,92	4,83	0,29	6,0	149,71	4,91	0,42	8,4	152,03
Fev	5,06	0,68	13,4	142,70	4,73	0,23	4,9	133,52	4,90	0,39	8,0	138,27
Mar	5,18	0,41	7,9	160,54	4,92	0,26	5,2	152,51	4,98	0,34	6,8	154,45
Abr	4,47	0,48	10,8	134,05	4,24	0,52	12,3	127,28	4,38	0,44	10,0	131,52
Mai	3,63	0,54	14,8	112,62	3,53	0,53	14,8	109,42	3,69	0,56	15,0	114,38
Jun	3,31	0,33	10,0	99,30	3,17	0,24	7,6	95,09	3,57	0,48	13,3	107,09
Jul	3,32	0,45	13,5	102,75	2,98	0,18	5,9	92,48	3,65	0,56	15,4	113,02
Ago	4,05	0,46	11,4	125,43	3,43	0,33	9,5	106,26	3,94	0,49	12,3	122,10
Set	4,93	0,44	8,9	148,04	3,94	0,47	11,8	118,12	4,31	0,40	9,3	129,28
Out	5,43	0,47	8,6	168,27	4,49	0,63	13,9	139,10	4,58	0,37	8,1	141,91
Nov	5,77	0,61	10,6	173,25	4,96	0,53	10,7	148,84	4,84	0,38	7,9	145,25
Dez	5,44	0,40	7,4	168,51	4,88	0,27	5,5	151,28	4,84	0,33	6,7	150,16
Média	4,65	T. Anual	1697,38	4,18	T. Anual	1523,61	4,38	T. Anual	1599,46			

Mês	Pão de Açúcar (AL)				Piranhas (AL)			
	Média (mm.dia ⁻¹)	DP (mm)	CV (%)	ETo (mm.mês ⁻¹)	Média (mm.dia ⁻¹)	D.P (mm)	CV (%)	ETo (mm.mês ⁻¹)
Jan	5,47	0,58	10,5	169,70	4,50	0,16	3,6	139,41
Fev	5,45	0,38	7,0	153,62	4,82	0,18	3,7	136,02
Mar	5,66	0,41	7,2	175,45	5,13	0,17	3,4	158,97
Abr	4,80	0,43	9,0	144,09	4,98	0,25	5,1	149,39
Mai	3,85	0,47	12,3	119,17	4,65	0,33	7,0	143,98
Jun	3,49	0,27	7,6	104,82	4,41	0,20	4,5	132,27
Jul	3,38	0,28	8,2	104,85	4,25	0,23	5,3	131,65
Ago	3,93	0,35	8,9	121,97	4,36	0,20	4,6	135,11
Set	4,49	0,45	10,0	134,60	4,41	0,31	6,9	132,16
Out	4,95	0,38	7,6	153,32	4,32	0,19	4,4	133,79
Nov	5,44	0,34	6,2	163,16	4,23	0,24	5,6	127,00
Dez	5,37	0,27	4,9	166,53	4,22	0,15	3,5	130,66
Média	4,69	T. Anual	1711,28	4,52	T. Anual	1650,42		

Mês	Propriá (SE)				Traipú (AL)			
	Média (mm.dia ⁻¹)	DP (mm)	C.V (%)	ETo (mm.mês ⁻¹)	Média (mm.dia ⁻¹)	DP (mm)	C.V (%)	ETo (mm.mês ⁻¹)
Jan	4,79	0,35	7,3	148,60	4,38	0,16	3,7	135,87
Fev	5,01	0,32	6,3	141,11	4,72	0,22	4,6	133,03
Mar	5,53	0,36	6,4	171,45	5,16	0,20	3,8	159,89
Abr	5,06	0,45	8,9	151,82	5,06	0,35	6,9	151,71
Mai	4,34	0,52	11,9	134,59	4,71	0,31	6,5	146,13
Jun	4,16	0,30	7,1	124,71	4,51	0,27	5,9	135,16
Jul	3,91	0,27	6,8	121,26	4,31	0,30	6,8	133,54
Ago	4,08	0,43	10,4	126,43	4,32	0,27	6,3	134,01
Set	3,92	0,48	12,2	117,70	4,27	0,29	6,7	128,06
Out	3,97	0,63	15,9	123,19	4,19	0,23	5,5	129,85
Nov	4,24	0,55	12,9	127,29	4,11	0,19	4,7	123,27
Dez	4,43	0,32	7,3	137,39	4,14	0,13	3,2	128,42
Média	4,45	T. Anual	1625,54	4,49	T. Anual	1638,93		

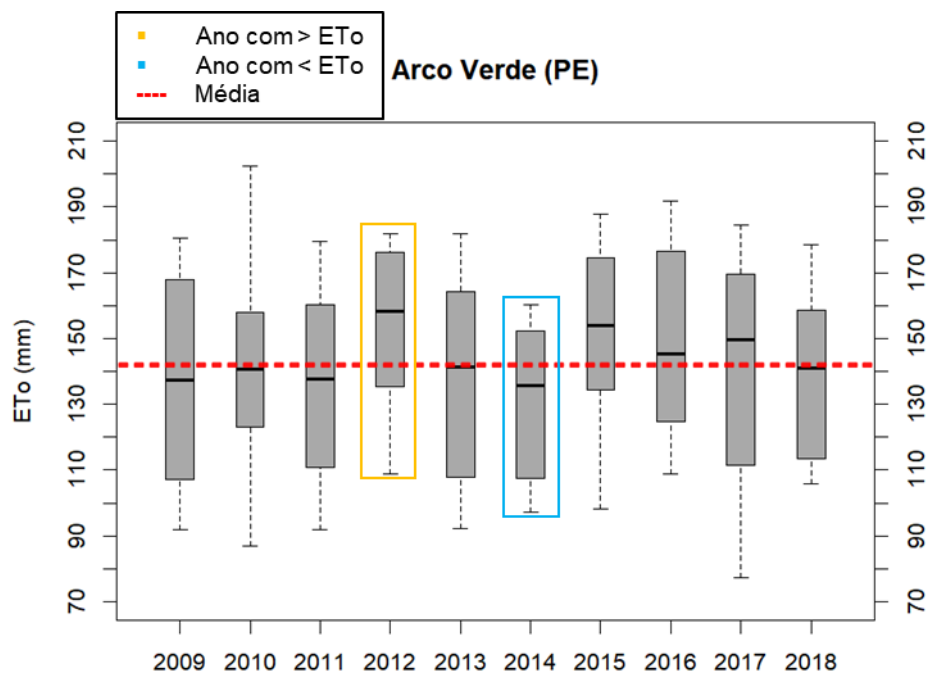
*Desvio Padrão (DP) e Coeficiente de Variação (CV). Fonte: Autor (2019)

Diferentemente da evaporação, a estação de Pão de Açúcar (AL) teve a maior média anual acumulada de ETo da série de dez anos, correspondendo à 1711,28 mm. A estação de Arapiraca (AL) aparece com a menor média acumulada do Baixo São Francisco com o valor de 1523,61 mm, tendo valores médios de ETo diária do período, correspondendo à 4,69 mm (maior do grupo) para Pão de Açúcar e 4,18 mm (menor do grupo) para Arapiraca. A média do total anual acumulada de (ETo) do BSF para as sete localidades de estudo foi de 1635,23 mm. Esse resultado foi semelhante aos estudos de Silva, S. S., (2017), que teve média anual de ETo para o Baixo São Francisco, o valor de 1631,94 mm.

4.4.1.2 Análise interanual da Evapotranspiração referência (ETo) em relação as Sub-bacias do Baixo São Francisco

Os valores totais anuais médios de Evapotranspiração de referência (ETo) para Arco Verde (Figura 16), localidade representante da Sub-bacia do Alto Ipanema, apresentaram para o período de estudo 2009 a 2018, seu maior e menor valor médio observado de 154,1 mm.mês⁻¹ em 2012 e 130,9 mm.mês⁻¹ em 2014, tendo sua média dos dez anos um valor de 141,4 mm.mês⁻¹.

Figura 16 – Boxplot da variação do total médio anual da Evapotranspiração de referência (ETo) (mm.mês⁻¹) observada na estação meteorológica do município de Arco Verde, representante da Sub-bacia do Alto Ipanema, para o período de 2009 a 2018.

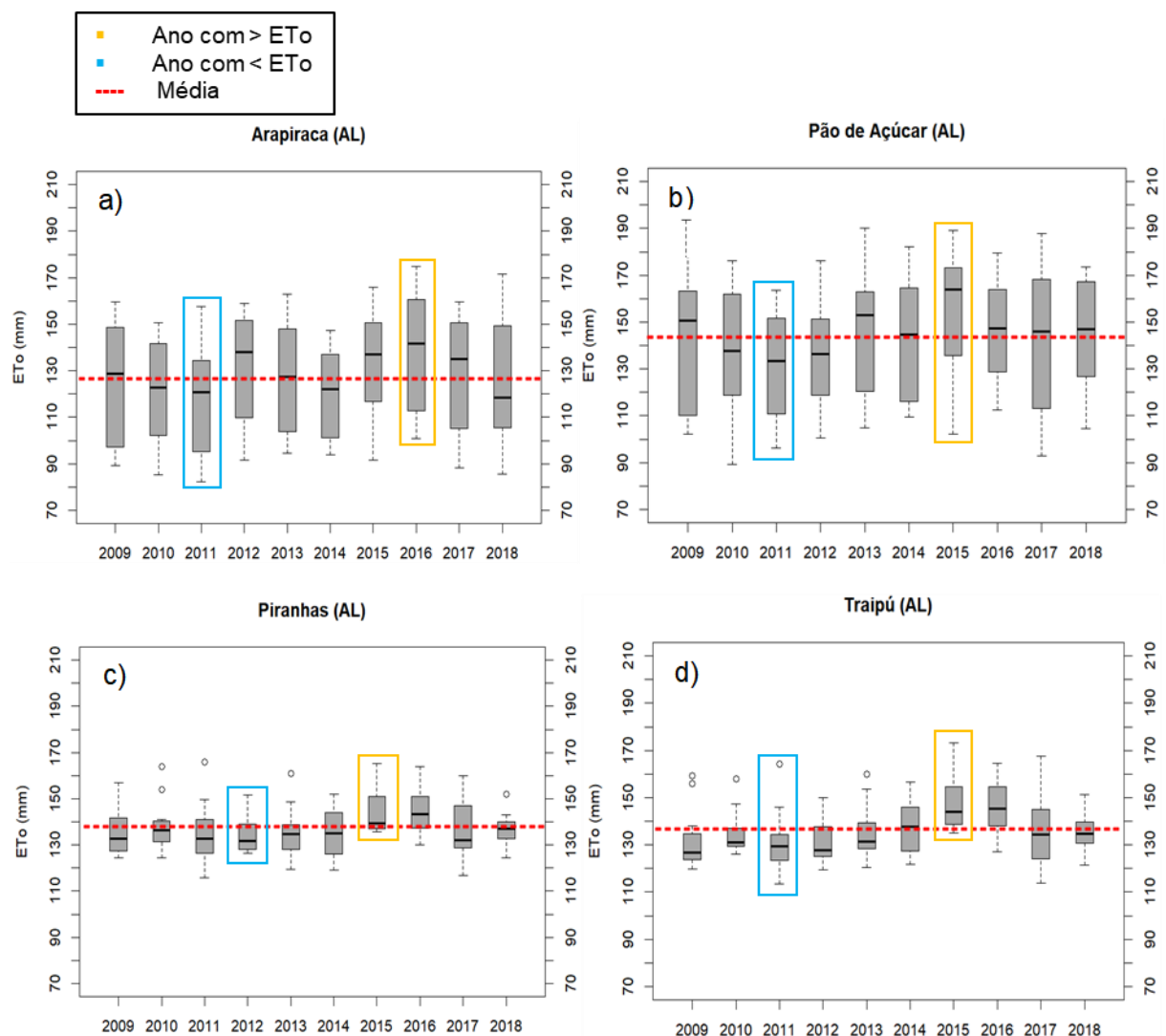


Fonte: Autor (2019)

Para esta localidade, os anos de maiores demandas hídricas foram 2012, 2015 e 2016, ambos acima da média do período, estando os anos de 2009, 2010, 2011, 2013, 2014, 2017 e 2018 abaixo da média.

Quanto a dispersão dos dados, os anos de 2009 e 2017 apresentaram maior variabilidade, sendo o ano de 2010 o que teve a média e sua mediana mais próxima da média do período, o que significa que de todos os anos, ele foi o que mais apresentou pouca variabilidade em 50% do seu conjunto de dados em relação a média. Na Figura 17 estão representadas as médias do período de estudo para as localidades pertencentes a Sub-bacia do Baixo São Francisco (AL).

Figura 17 – Boxplot da variação do total médio anual da Evapotranspiração de referência (ETo) (mm.mês^{-1}) observada nas estações meteorológicas dos municípios de Arapiraca (a), Pão de Açúcar (b), Piranhas (c) e Traipú (d), representantes da Sub-bacia do Baixo São Francisco (AL), para o período de 2009 a 2018.



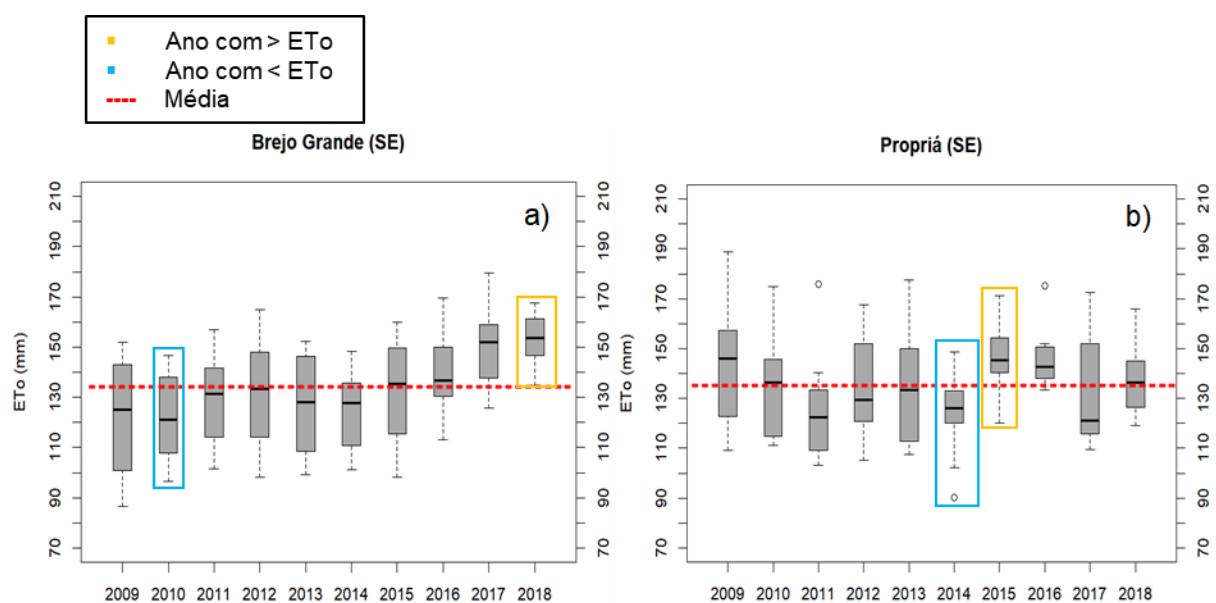
Fonte: Autor (2019)

As médias encontradas foram: Arapiraca ($126,9 \text{ mm.mês}^{-1}$), Pão de Açúcar ($142,6 \text{ mm.mês}^{-1}$), Piranhas ($137,5 \text{ mm.mês}^{-1}$) e Traipú ($136,5 \text{ mm.mês}^{-1}$). Os anos que apresentaram maiores valores dos totais anuais médios de evaporação na região foram em 2015 para Pão de Açúcar ($154,0 \text{ mm.mês}^{-1}$), Piranhas ($144,6 \text{ mm.mês}^{-1}$) e Traipú ($112,5 \text{ mm.mês}^{-1}$) e, no ano de 2016 para Arapiraca ($138,5 \text{ mm.mês}^{-1}$). Os menores valores foram nos anos de 2011 para Arapiraca ($118,1 \text{ mm.mês}^{-1}$), Traipú ($131,0 \text{ mm.mês}^{-1}$) e Pão de Açúcar ($131,5 \text{ mm.mês}^{-1}$) e, no ano de 2012 para Piranhas ($134,4 \text{ mm.mês}^{-1}$). Para a região a maior demanda hídrica ocorreu no município de Pão de Açúcar em 2015 e a menor em Arapiraca em 2011.

Ainda na Figura 17, uma análise sobre a dispersão dos dados na região mostra que Pão de Açúcar apresentou em 2017 uma maior variabilidade nos valores de evapotranspiração e Piranhas teve em 2018, uma menor variabilidade.

Para a Sub-bacia do Baixo São Francisco (SE) (Figura 18), as localidades de Brejo Grande e Propriá, apresentaram como médias para o período $133,2$ e $135,4 \text{ mm.mês}^{-1}$, respectivamente. Teve como maiores e menores totais anuais médios respectivamente no ano de 2018 e 2010 ($152,8$ e $122,4 \text{ mm.mês}^{-1}$) em Brejo Grande e para Propriá em 2015 e 2014 ($146,0$ e $124,7 \text{ mm.mês}^{-1}$) respectivamente.

Figura 18 – Boxplot da variação do total médio anual da Evapotranspiração de referência (ET_o) (mm.mês^{-1}) observada nas estações meteorológicas dos municípios de Brejo grande (a) e Propriá (b), representantes da Sub-bacia do Baixo São Francisco (SE), para o período de 2009 a 2018.



Fonte: Autor (2019)

A maior e menor demanda hídrica ocorreu em 2018 e 2010, respectivamente, na localidade de Brejo Grande, bem como foi a localidade nessa sub-bacia que apresentou em 2009, maior variabilidade, tendo Propriá apresentado, a menor variabilidade em 2014.

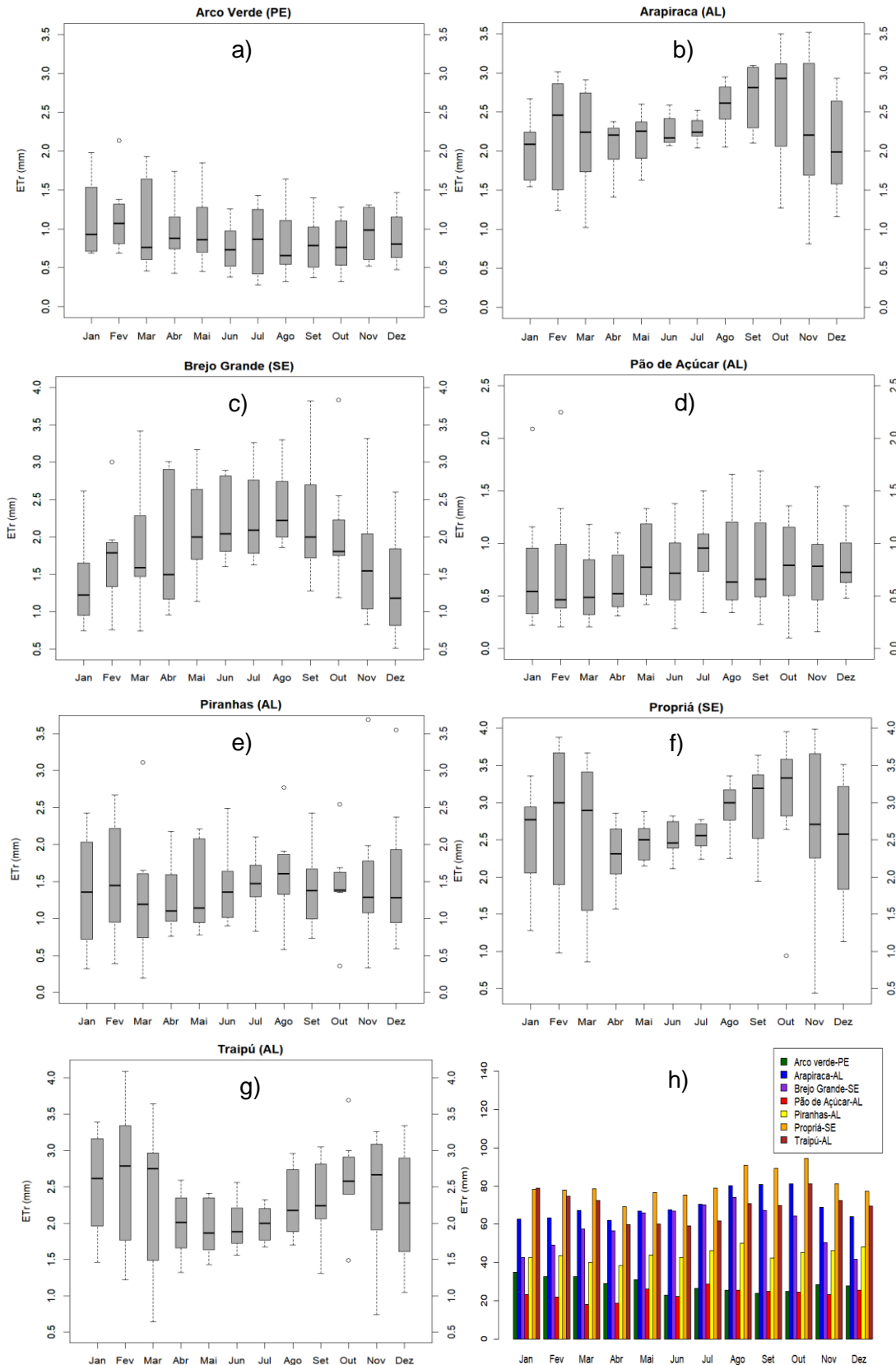
Uma observação importante a se fazer na Figura 18 é de que Brejo Grande apresentou de 2009 a 2015 valores médios mensais de ETo abaixo da média do período. Resultado esse que variou durante os dez anos de estudo para a localidade de Propriá. As duas estações da sub-bacia do BSF (SE) demonstraram um comportamento diferenciado para com as demais localidades, pois de acordo com a Tabela 13, os totais médios anuais de ETo foram os menores, perdendo apenas para Arapiraca. Esses valores corroboram com resultados de valores médios de umidade relativa do ar no período para estas estações (Tabela 12), que foram valores mais altos, juntamente com Arapiraca.

4.4.2 Evapotranspiração real (ETr) por meio de sensoriamento remoto

4.4.2.1 Análise diária e mensal da Evapotranspiração real (ETr) LSA SAF

Os resultados de Evapotranspiração real (ETr) do Baixo São Francisco no período de 2011 a 2018, apresentou resultados diferentes de uma localidade para outra, dentro do ciclo de doze meses. A (ETr) teve seus valores mínimos de acordo com a Figura 19, nas estações meteorológicas das localidades de Piranhas (0,19 mm.dia⁻¹) e Traipú (0,64 mm.dia⁻¹) em março, Arco Verde (0,28 mm.dia⁻¹) em julho, Pão de Açúcar (0,10 mm.dia⁻¹) em outubro, Arapiraca (0,81 mm.dia⁻¹) e Propriá (0,44 mm.dia⁻¹) em novembro e, por fim, Brejo Grande (0,51 mm.dia⁻¹) em dezembro. Com relação aos valores máximos de (ETr), os mesmos ocorreram no mês de fevereiro para Arco Verde (2,14 mm.dia⁻¹), Pão de Açúcar (2,25 mm.dia⁻¹) e Traipú (4,09 mm dia⁻¹), em outubro para Brejo Grande (3,83 mm.dia⁻¹) e em novembro para Arapiraca (3,52 mm.dia⁻¹), Piranhas (3,69 mm.dia⁻¹) e Propriá (3,99 mm.dia⁻¹). Desses resultados, destacamos que a maior parte das localidades apresentam seus mínimos e máximos no período seco.

Figura 19 – Boxplot média diária (mm.dia⁻¹) da Evapotranspiração Real (ETr) para as estações de Arco Verde (a), Arapiraca (b), Brejo Grande (c), Pão de Açúcar (d), Piranhas (e), Traipú (f) e Propriá (g). Gráfico de barras do acumulado médio mensal (h) para o período de 2011 a 2018.



Fonte: Autor (2019)

Nos estudos de Martins (2015), foi realizada uma estimativa de evapotranspiração real a partir de imagens do sensor MODIS/AQUA e do algoritmo SEBAL na bacia do Rio Paranaíba, onde obtiveram resultados semelhantes para a ETr quando comparados em escala diária. Conforme estudo apresentaram valores médios de $3,4 \text{ mm.dia}^{-1}$ para o ano de 2013, sendo esses valores observados predominantemente em áreas de pastagens e cerrado aberto. Solos agrícolas em pousio e pastagens degradadas apresentaram valores inferiores a 2 mm/dia , chegando a índices próximos a 0 mm.dia^{-1} em áreas de solo arenoso exposto. Os maiores valores, assim como acontece com a evapotranspiração instantânea, foram registrados sobre os espelhos d'água, que chegaram a apresentar índices superiores a $10,0 \text{ mm.dia}^{-1}$. Logo, neste trabalho tivemos localidades que se assemelharam tanto, nos resultados como nos aspectos físicos e biológicos.

Com relação aos valores de acumulado médio mensal de evapotranspiração real (Figura 19h), para o período de estudo, Pão de Açúcar apresentou o menor valor ($92,5 \text{ mm}$) no mês de março e Propriá teve o maior valor dentre as demais ($175,0 \text{ mm}$) no mês de outubro. Esses resultados divergiram dos resultados de Evaporação e Evapotranspiração de referência.

A Estatística descritiva para a Evapotranspiração real (ETr) (Tabela 15), produto LSA SAF, trouxe uma análise curiosa sobre a resposta do dado para a região do Baixo São Francisco. Das sete localidades analisadas, três delas tiveram altos valores de CV: Pão de Açúcar, Piranhas e Arco Verde. Os maiores valores que representaram a variabilidade dos dados, em relação à média, ficaram acima de $\sim 40\%$, sendo que o menor valor foi para Arapiraca de $\sim 21,2\%$. Isso indicou que os resultados de ETr tiveram uma variabilidade alta para o período de estudo em todos os cenários, não sendo a média um forte indicador para representar a ETr, neste caso.

Quanto a maior média anual acumulada de ETr do período (2011-2018), Propriá apresentou o maior valor do BSF, correspondendo à $967,59 \text{ mm}$. A estação de Pão de Açúcar aparece com a menor média acumulada de $282,44 \text{ mm}$, tendo valores de ETr média diária do período, correspondendo à $2,65 \text{ mm}$ (maior do grupo) e $0,77 \text{ mm}$ (menor do grupo), respectivamente. A média do total anual acumulada de (ETr) do BSF para as sete localidades de estudo foi de $641,61 \text{ mm}$.

Tabela 15 – Estatística descritiva para o período de 2011 a 2018, referente aos valores médios mensais de Evapotranspiração real (ETr) das Estações de Arco Verde (PE), Arapiraca (AL), Brejo Grande (SE), Pão de Açúcar (AL), Piranhas (AL), Propriá (SE) e Traipú (AL). *DP e CV.

Mês	Arco Verde (PE)				Arapiraca (AL)				Brejo Grande (SE)			
	Média (mm.dia ⁻¹)	DP (mm)	CV (%)	ETr (mm.mês ⁻¹)	Média (mm.dia ⁻¹)	DP (mm)	CV (%)	ETr (mm.mês ⁻¹)	Média (mm.dia ⁻¹)	DP (mm)	CV (%)	ETr (mm.mês ⁻¹)
Jan	1,13	0,52	46,4	34,95	2,02	0,39	19,5	62,56	1,38	0,61	44,6	42,64
Fev	1,15	0,46	40,3	32,56	2,24	0,72	32,2	63,39	1,73	0,66	37,8	48,96
Mar	1,05	0,59	56,3	32,59	2,17	0,66	30,5	67,30	1,86	0,81	43,5	57,52
Abr	0,97	0,39	40,6	28,94	2,07	0,32	15,6	62,24	1,89	0,89	47,4	56,73
Mai	1,00	0,48	48,3	30,94	2,16	0,32	14,9	67,02	2,12	0,67	31,4	65,78
Jun	0,76	0,30	39,8	22,82	2,26	0,19	8,6	67,69	2,23	0,53	24,0	66,79
Jul	0,85	0,45	53,2	26,27	2,28	0,15	6,6	70,58	2,27	0,59	26,1	70,31
Ago	0,82	0,43	52,5	25,46	2,59	0,31	11,9	80,22	2,39	0,50	21,0	73,99
Set	0,80	0,36	45,4	23,99	2,70	0,41	15,2	80,81	2,24	0,81	36,3	67,31
Out	0,80	0,34	42,9	24,75	2,62	0,75	28,6	81,31	2,07	0,80	38,6	64,29
Nov	0,95	0,35	36,7	28,36	2,30	0,93	40,6	68,90	1,68	0,82	48,9	50,26
Dez	0,89	0,34	38,2	27,61	2,06	0,64	31,0	63,93	1,35	0,70	52,2	41,81
Média	0,93	T.Anual		339,24	2,29	T.Anual		835,94	1,93	T.Anual		706,39

Mês	Pão de Açúcar (AL)				Piranhas (AL)			
	Média (mm.dia ⁻¹)	DP (mm)	C.V (%)	ETr (mm.mês ⁻¹)	Média (mm.dia ⁻¹)	DP (mm)	C.V (%)	ETr (mm.mês ⁻¹)
Jan	0,75	0,62	83,2	23,17	1,37	0,80	58,3	42,46
Fev	0,77	0,69	89,7	21,77	1,54	0,80	52,3	43,52
Mar	0,59	0,36	61,1	18,22	1,30	0,89	68,4	40,18
Abr	0,63	0,30	47,2	18,84	1,28	0,52	40,3	38,47
Mai	0,84	0,36	42,5	25,97	1,41	0,60	42,5	43,83
Jun	0,74	0,39	52,7	22,30	1,43	0,52	36,1	42,73
Jul	0,93	0,34	36,8	28,71	1,49	0,39	26,0	46,14
Ago	0,83	0,47	57,5	25,60	1,62	0,63	39,0	50,11
Set	0,83	0,52	62,9	24,73	1,41	0,54	38,4	42,18
Out	0,80	0,43	54,1	24,60	1,46	0,59	40,8	45,13
Nov	0,77	0,43	55,2	23,14	1,54	0,99	64,5	46,15
Dez	0,82	0,31	37,3	25,39	1,56	0,97	62,2	48,26
Média	0,77	T.Anual		282,44	1,45	T.Anual		529,16

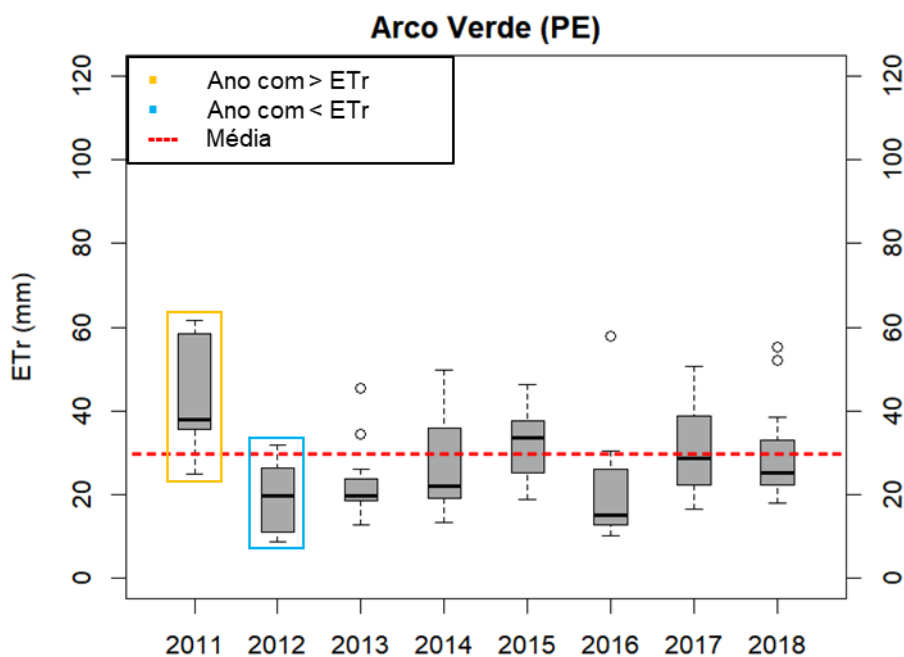
Mês	Propriá (SE)				Traipú (AL)			
	Média (mm.dia ⁻¹)	DP (mm)	C.V (%)	ETr (mm.mês ⁻¹)	Média (mm.dia ⁻¹)	DP (mm)	C.V (%)	ETr (mm.mês ⁻¹)
Jan	2,52	0,68	27,1	78,18	2,54	0,74	29,2	78,82
Fev	2,75	1,06	38,4	77,91	2,64	1,03	39,1	74,85
Mar	2,53	1,07	42,1	78,49	2,34	1,01	43,4	72,43
Abr	2,30	0,42	18,1	69,13	1,99	0,44	21,9	59,82
Mai	2,47	0,26	10,6	76,70	1,94	0,39	20,1	60,17
Jun	2,52	0,24	9,6	75,40	1,97	0,34	17,3	59,11
Jul	2,55	0,19	7,5	79,01	1,99	0,25	12,7	61,69
Ago	2,94	0,35	11,9	90,94	2,28	0,48	20,9	70,69
Set	2,97	0,60	20,1	89,13	2,32	0,56	24,3	69,73
Out	3,04	0,94	30,9	94,33	2,62	0,62	23,7	81,17
Nov	2,71	1,14	42,1	81,27	2,42	0,86	35,4	72,51
Dez	2,49	0,84	33,9	77,10	2,24	0,80	35,7	69,57
Média	2,65	T.Anual		967,59	2,27	T.Anual		830,55

*Desvio Padrão (DP) e Coeficiente de Variação (CV). Fonte: Autor (2019)

4.4.2.2 Análise interanual da Evapotranspiração real (ET_r) em relação as Sub-bacias do Baixo São Francisco.

A análise interanual da ET_r foi observada para as sub-bacias do BSF, referente ao período de 2011-2018. Os valores totais anuais médios de Evapotranspiração real (ET_r) para Arco Verde (Figura 20), localidade representante da Sub-bacia do Alto Ipanema, apresentaram, seu maior e menor valor médio observado de 43,7 mm.mês⁻¹ em 2011 e 19,5 mm.mês⁻¹ em 2012, respectivamente. Sua média do período de oito anos foi de 28,2 mm.mês⁻¹. Para esta localidade, os anos de maiores demandas hídricas foram 2011, 2015 e 2017, ambos acima da média do período, tendo as menores demandas os anos de 2012, 2013 e 2016, sendo suas médias anuais abaixo da média do período.

Figura 20 – Boxplot da variação do total média anual da Evapotranspiração Real (ET_r) (mm.mês⁻¹) observada na estação meteorológica do município de Arco Verde, representante da Sub-bacia do Alto Ipanema, para o período de 2011 a 2018.



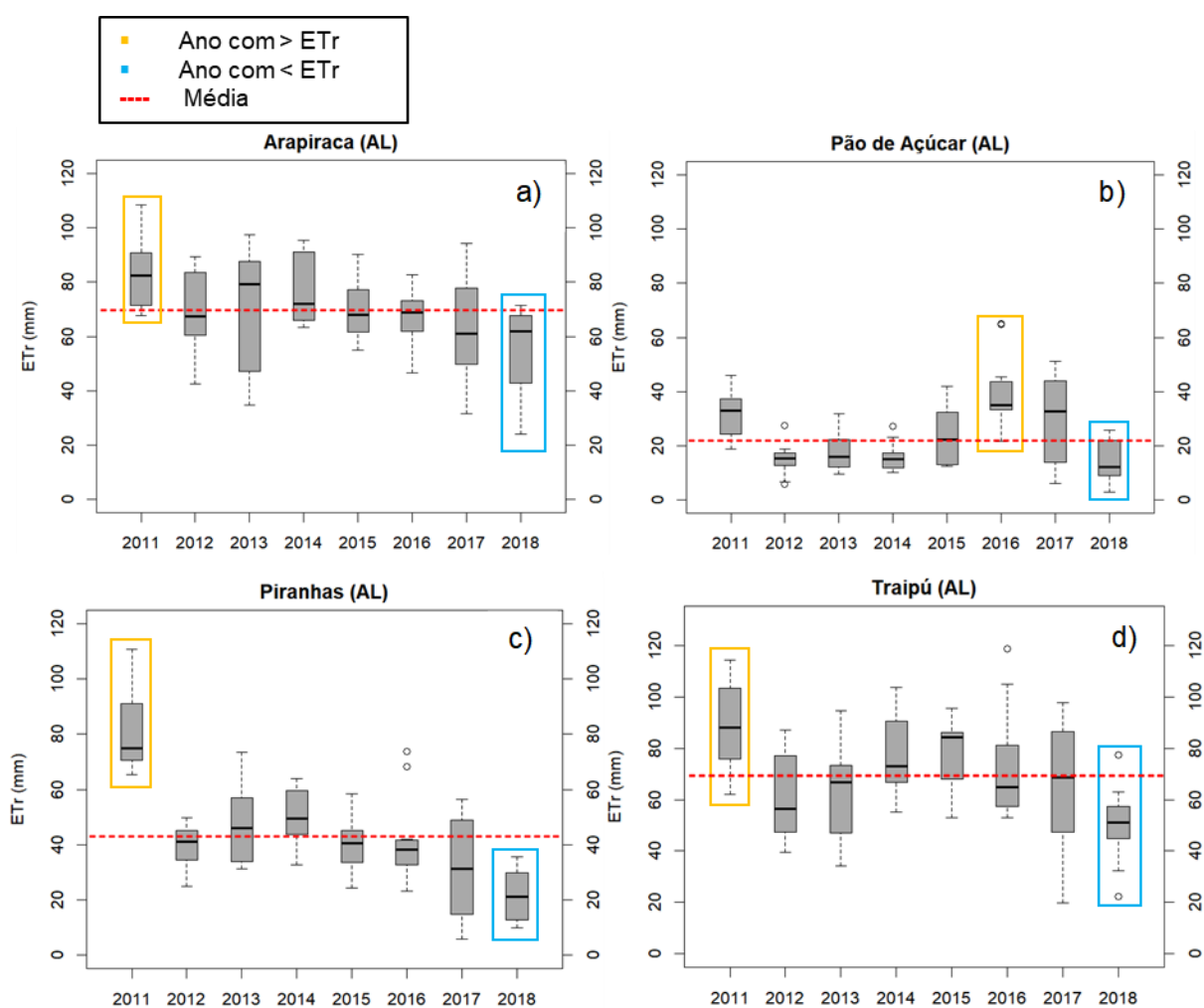
Fonte: Autor (2019)

Quanto a dispersão dos dados, o ano de 2011 apresentou maior variabilidade, sendo o ano de 2017 o que teve a média e sua mediana mais próxima da média do período, o que significa que de todos os anos, ele foi o que mais apresentou pouca variabilidade em 50% do seu conjunto de dados em relação à média.

Na Figura 21 está representada as médias do período de estudo para as localidades pertencentes a Sub-bacia do Baixo São Francisco (AL). As médias

encontradas foram: Arapiraca ($69,6 \text{ mm.mês}^{-1}$), Pão de Açúcar ($23,5 \text{ mm.mês}^{-1}$), Piranhas ($44,0 \text{ mm.mês}^{-1}$) e Traipú ($69,2 \text{ mm.mês}^{-1}$). Os anos que apresentaram maiores valores dos totais anuais médios de evapotranspiração real na região foram em 2011 para Traipú ($88,4 \text{ mm.mês}^{-1}$), Arapiraca ($84,0 \text{ mm.mês}^{-1}$) e Piranhas ($81,5 \text{ mm.mês}^{-1}$) e, em 2016 para Pão de Açúcar ($39,0 \text{ mm.mês}^{-1}$). Os menores valores ocorreram todos em 2018 para todas as localidades da sub-bacia, sendo para Arapiraca ($55,1 \text{ mm.mês}^{-1}$), Traipú ($50,1 \text{ mm.mês}^{-1}$), Piranhas ($21,4 \text{ mm.mês}^{-1}$) e Pão de Açúcar ($14,3 \text{ mm.mês}^{-1}$). Para a região a maior demanda hídrica ocorreu para a localidade de Traipú em 2011 e a menor em Pão de Açúcar em 2018.

Figura 21 – Boxplot da variação do total médio anual da Evapotranspiração Real (ETr) (mm.mês^{-1}) observada nas estações meteorológicas dos municípios de Arapiraca (a), Pão de Açúcar (b), Piranhas (c) e Traipú (d), representantes da Sub-bacia do Baixo São Francisco (AL), para o período de 2011 a 2018.

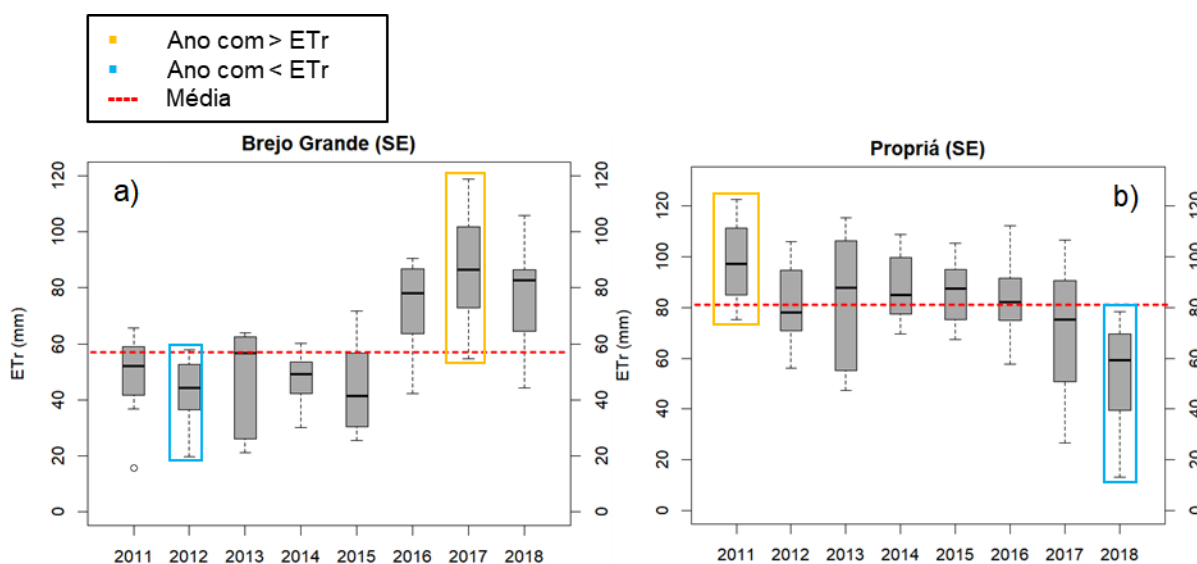


Fonte: Autor (2019)

Ainda na Figura 21, uma análise sobre a dispersão dos dados na região mostra que Arapiraca apresentou em 2013 uma maior variabilidade nos valores de (ETr) e Pão de Açúcar em 2012, teve uma menor variabilidade no conjunto de seus dados.

Para a Sub-bacia do Baixo São Francisco (SE) (Figura 22), as localidades de Brejo Grande e Propriá, apresentaram como médias para os oito anos de estudo, 58,8 e 80,6 mm.mês⁻¹, respectivamente. Tendo alcançado como maiores e menores totais anuais médios respectivamente no ano de 2017 e 2012 (88,0 e 42,8 mm.mês⁻¹) em Brejo Grande e para Propriá em 2011 e 2018 (98,4 e 53,8 mm.mês⁻¹) respectivamente. A maior e menor demanda hídrica ocorreu em 2011 e 2012, respectivamente, na localidade de Propriá e Brejo Grande. A maior e menor variabilidade ocorreu em 2013 e 2014, para Propriá e Brejo grande, respectivamente. É importante lembrar que de acordo com Marengo et al. (2016), esse mesmo período sofreu uma seca que foi considerada a maior deste século.

Figura 22 – Boxplot da variação do total anual da Evapotranspiração Real (ETr) (mm.mês⁻¹) observada nas estações meteorológicas dos municípios de Brejo grande (a) e Propriá (b), representantes da Sub-bacia do Baixo São Francisco (SE), para o período de 2011 a 2018.



Fonte: Autor (2019)

4.5 Análise comparativa dos resultados anuais de Evaporação, Evapotranspiração e Precipitação no Baixo São Francisco

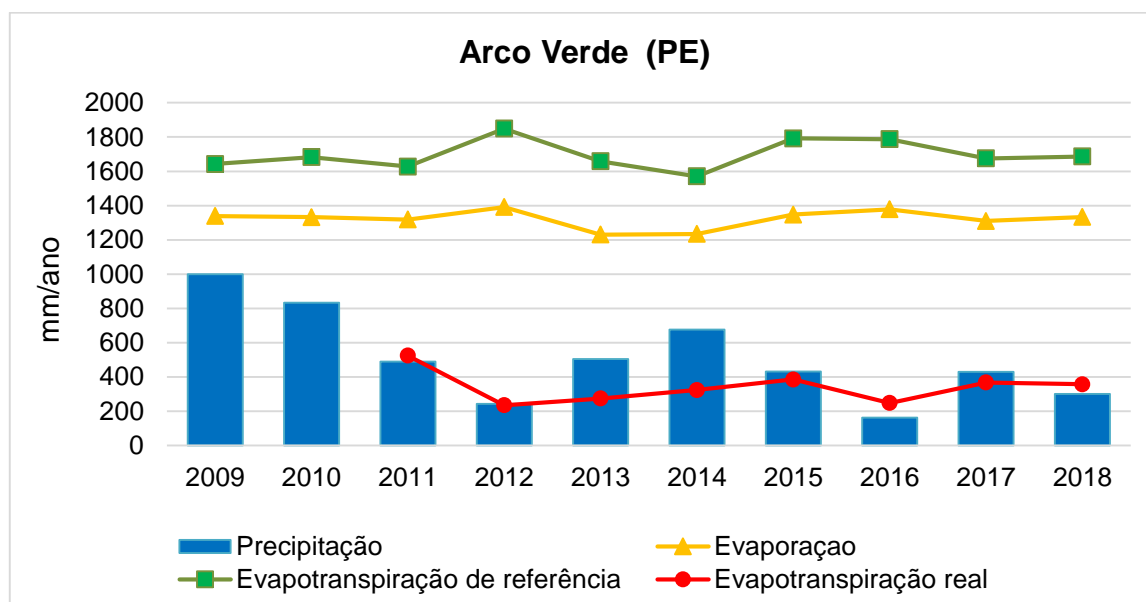
Após estimativas da evaporação, evapotranspiração de referência e real foi possível fazer uma análise do cenário de cada localidade, dentro de suas sub-

bacias, em referência aos totais anuais de cada um objeto desse estudo com os totais anuais de precipitação.

A localidade de Arco Verde na sub-bacia do Alto Ipanema BSF (Figura 23), apresentou no estudo, padrões sazonais similares nos períodos chuvoso e seco (Figura 23) para (E) e ETo, onde nos anos de maiores volumes de precipitação 2009 (999 mm/ano) e 2010 (833 mm/ano), foram os anos de menores Evaporações (1.338,8 e 1332,9 mm/ano) e ETo (1643,0 e 1682,7 mm/ano). Esse padrão é muito peculiar aos processos físicos da atmosfera, onde os dias chuvosos, são dias de menores evaporações. Com relação a ETr, a mesma apresentou valores baixos se equiparando aos volumes de precipitação, com exceção dos anos de 2013, 2014 e 2017, onde tiveram maiores volumes de chuvas e superaram os valores de ETr.

Em especial o ano de 2012 teve a menor ETr (234,35 mm/ano), por isso vale lembrar que nos anos de 2013 e 2014 as chuvas aumentaram no NEB, após o ano de 2012, que foi considerado o ano mais seco das últimas décadas, conforme Marengo et al. (2016).

Figura 23 – Gráfico de barras do acumulado anual de Evaporação, Evapotranspiração de referência, Evapotranspiração real e Precipitação para Arco Verde (PE), representante da Sub-bacia do Alto Ipanema, período de 2009 a 2018.

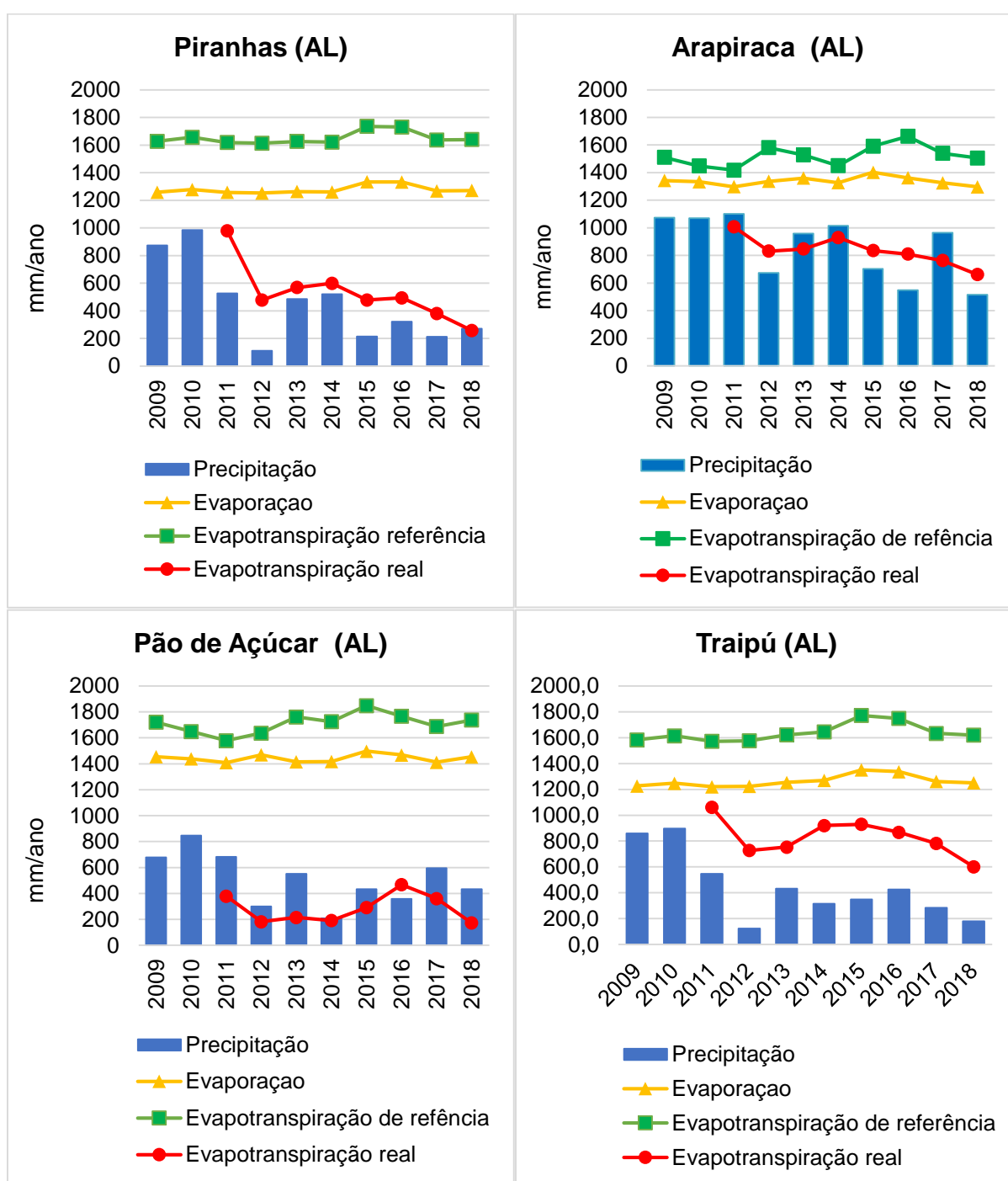


Fonte: Autor (2019)

Para a sub-bacia do Baixo São Francisco (AL) (Figura 24), Arapiraca obteve o maior volume de chuva, no período de estudo, sendo o ano de 2011 com maior valor (1101,0 mm/ano). Sendo traipú, a localidade com maior ETr (1061,20 mm/ano) em

2011. Já os maiores valores de (E) e Eto ocorreram para Pão de Açúcar em 2015 (1497,4 e 1848,7 mm/ano), respectivamente (Figura 24).

Figura 24 – Gráfico de barras do cumulado anual de Evaporação, Evapotranspiração de referência, Evapotranspiração real e Precipitação para Arapiraca (AL), Pão de Açúcar (AL), Piranhas (AL) e Traipú (AL), representantes da Sub-bacia do Baixo São Francisco (AL), período de 2009 a 2018.



Fonte: Autor (2019)

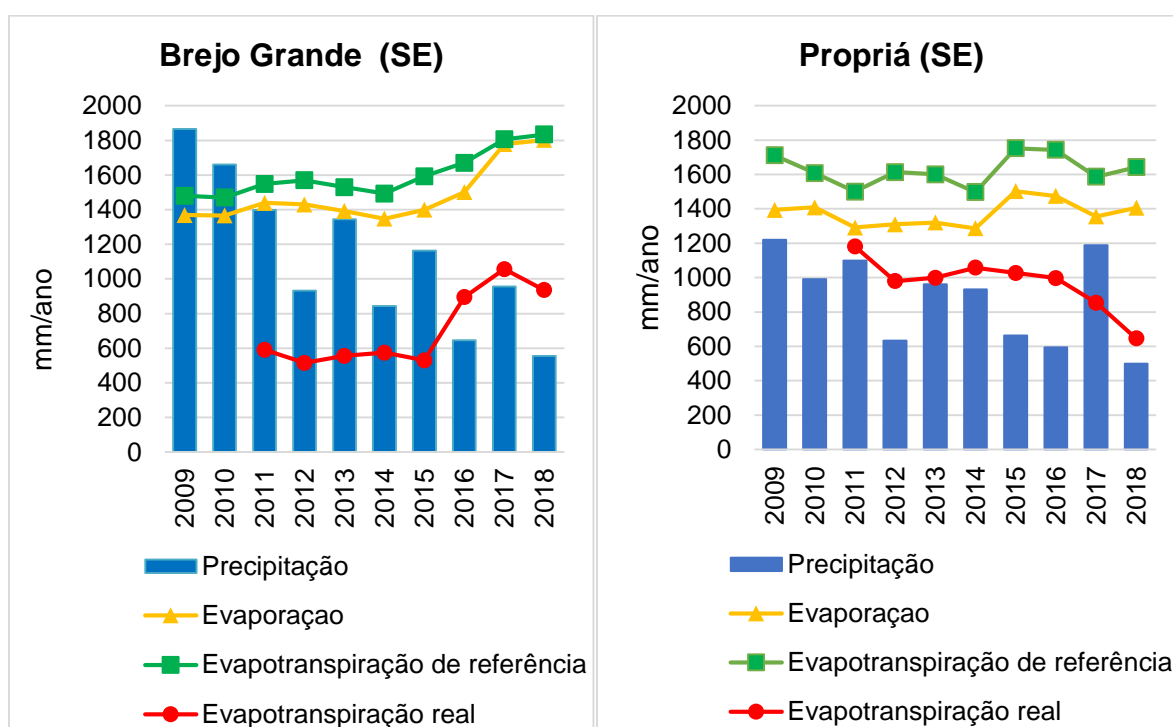
Também a mesma (Pão de Açúcar), obteve o menor valor de ETr em 2018 (172,2 mm/ano) em todo o BSF. É importante ressaltar que para essa estação os

valores de ETr tiveram seu CV elevado, o que é possível ponderar, pois ao analisar a localização da estação, verificou-se que a área possui uma vegetação rasteira e, nos seus arredores, há existência de área descampada, o que pode ter levado a uma situação próxima das condições utilizadas para a escolha do *pixel* “quente” de acordo com esquema da Figura 08.

É importante destacar que as localidades de Piranhas e Traipú revelaram um padrão para o comportamento da E, ETo, ETr e Precipitação bem semelhantes. O que não ocorre com as demais. Já com relação ao período de seca, em 2012 foi comum para todas as estações da sub-bacia do BSF (AL), a diminuição das chuvas após anos com maiores volumes (2009 e 2010), seguido do aumento de chuvas a partir de 2013.

Em relação às estações da sub-bacia do Baixo São Francisco (SE) na Figura 25, não ficou evidente entre as estações, um padrão com relação ao comportamento dos valores de (E), ETo e ETr. Porém, há similaridades nos volumes de precipitação durante o período estudado.

Figura 25 – Gráfico de barras do acumulado anual de Evaporação, Evapotranspiração de referência, Evapotranspiração real e Precipitação para Brejo Grande (SE), Propriá (SE), representantes da Sub-bacia do Baixo São Francisco (SE), período de 2009 a 2018.



Fonte: Autor (2019)

A (E) e ETo apresentaram maiores valores em 2018 (1833,7 e 1802,1 mm/ano), respectivamente para Brejo Grande. Também pode-se confirmar, quanto ao volume de chuvas, que Brejo Grande apresentou em 2009, dentre todas as estações estudadas, o maior valor (1865,0 mm/ano), assim como para a maior parte dos anos estudados. Já Propriá apresentou a maior ETr do Baixo São Francisco em 2011 (1181,5 mm/ano). Também pôde-se verificar pelo na Figura 25 que as duas localidades da sub-bacia BSF (SE), apresentaram padrões similares para os parâmetros de Evaporação, Evapotranspiração e Precipitação, divergindo na Evapotranspiração real. Pode-se levar em consideração nesse resultado para ETr, que foi maior para Propriá, pois a mesma está mais distante do litoral do que Brejo Grande que já sofre com as influências de umidade vinda do oceano.

5 CONCLUSÕES

A partir dos objetivos propostos e metodologia desenvolvida para a execução do estudo com resultados apresentados nesse trabalho, conclui-se:

- o método estatístico média preditiva (Predictive Mean Matching-PMM), do pacote (MICE), utilizado para o preenchimento de falhas, mostrou-se eficiente para utilização com dados de estações meteorológicas de superfície, destacando que para um elevado número de falhas, foi feito um teste preliminar para validação do método;
- as análises dos dados das variáveis meteorológicas de precipitação pluviométrica, radiação solar global, temperatura média, umidade relativa do ar e velocidade do vento, tiveram resultados condizentes, para as estações de estudo, com as observadas na literatura. Esses resultados auxiliaram nas discussões do estudo para a região do BSF;
- o objetivo proposto de se estimar a evaporação pelo método Penman (1948), analisando sua dinâmica diária, mensal e interanual foi alcançado, permitindo uma representação da variabilidade espacial dessa variável da região de estudo, tendo sido sua estimativa respaldada estatisticamente;
- os resultados de Evaporação (E) e Evapotranspiração de referência (ET_o) demonstraram similaridades no aspecto sazonal entre as estações de estudo, comprovando a eficácia do método com trabalhos realizados na região;
- a Evapotranspiração real (ET_r) apresentou algumas peculiaridades para regiões de clima semiárido, precisando de maiores pesquisas e averiguações in loco como forma de calibrar melhor o dado para regiões semiáridas;
- as análises comparativas entre os resultados das estimativas de evaporação e evapotranspiração de referência e real, com dados de precipitação do período de estudo, foram significativas para a identificação de padrões de Evaporação, Evapotranspiração e Precipitações ocorridas no Baixo São Francisco, resultando em informações que ajudarão a subsidiar estudos futuros no planejamento e ordenamento dos recursos naturais na nossa região.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; SMITH, M.; PERRIER, A. An update for the definition of reference evapotranspiration. **ICID BULLETIN**, v. 43, n. 2, p.1-34, 1994.

ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration -Guidelines for computing crop water requirements - **FAO Irrigation and drainage paper**. n. 56, 1998. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/284300773_FAO_Irrigation_and_drainage_paper_No_56>. Acesso em: 10 set. 2018.

ALLEN, R. G. et al. **SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) advanced training and users manual** – Idaho implementation. Idaho: IdahoUniversity, USA, 2002. 98p. Disponível em: < <http://www.posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2016/09/MET-479-Waters-et-al-SEBAL.pdf>>. Acesso em: 15 dez. 2018.

AMARO, H. A.; LACERDA, E. G.; MOLION, L. C. B. Um episódio da Zona de Convergência na América do Sul. **Anais**. XVI Congresso de Meteorologia. 2010. Disponível em: < <http://www.sbmet.org.br/cbmet2010/8.html>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

ANA. **Agência Nacional de Águas (Brasil)**. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras – Edição Especial. -- Brasília: ANA, 2015.

ARAÚJO, L. E. et al. **Análise estatística de chuvas intensas na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba**. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, p. 162-169, 2008. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862008000200005>>. Acesso em: 22.nov.2018.

BARBOSA, H.B.; FERNÁNDEZ, J. I. P. **O olhar METEOSAT sobre a Atmosfera**. **Revista CIRRUS**. UNEMET Brasil. Set-Nov 2007. ISSN 1981-5476.

BARROS, A. et al. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em perímetro irrigado no Baixo São Francisco. Fortaleza, CE, INOVAGRI – <http://www.inovagri.org.br> **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada** v.11, nº.8, p. 2183 - 2193DOI: 10.7127/rbai.v11n800707., 2017.

BASTOS, C.; FERREIRA, N. Análise climatológica da alta subtropical do atlântico sul. In: XI congresso brasileiro de meteorologia. **Anais**. Rio de Janeiro, pp. 612-619. 2000.

BENZAGHTA, M. A. et al. Comparison of evaporation estimate models for surface evaporation in semiarid region of Libya: a case study. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v 38, n. 12, p. 1373-1380, 2011.

BERNARDES, L. M. C. Os tipos de clima do Brasil. **Bol. Geogr.** n. 9, p. 988-997, 1951.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8 ed. Viçosa:UFV, 2006. 625p.

BODNER, T.E. What Improves with Increased Missing Data Imputations? Structural Equation Modeling: **A Multidisciplinary Journal**, 15, 651-675. 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/10705510802339072>>. Acesso em: 22.nov.2018.

BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere**. Dordrecht: D. Reidel Publishing, 1988. 299 p.

BUSSAB, W. O; MORETTIN, P. A. **Estatística Básica**. 6. ed. São Paulo: Saraiva, 2010.

CABRAL J. J. B.; ALMEIDA, H. A.; SILVA, C. M. S. **Comparação de dados diários de evapotranspiração de referência estimados pelos métodos de Penman-Monteith e tanque classe A, para Campina Grande, PB**. Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização (Latu Sensu). Universidade Estadual da Paraíba, 2014.

CALBETE, N. D.; GAN, M.; SATYAMURTY, P. Vórtices ciclônicos da alta troposfera que atuam sobre a região nordeste do Brasil. **Revista Climanálise**, Cachoeira Paulista, SP, Edição especial 10, 1996.

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

CAMACHO, F. et al. LSA SAF Product User Manual Evapotranspiration (ET). SAF/LAND/IM/PUM_MET-DMET. **Revision Index: v2.5**. 2015

CARVALHO, L. G. et al. Evapotranspiração de referência: Uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n.3, p. 456 – 465, 2011. Disponível em: <<https://www.revistas.ufg.br/pat/article/view/12760/9732> >. Acesso em: 22.nov.2018.

CHOUDHURY, B. J., Multispectral satellite data in the context of land surface heat balance. **Rev. Geophys.**, **29**, 217–236. 1991.

CBHSF. **Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco – PBHSF (2004-2013)** – Resumo Executivo. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – PNUMA e Organização dos Estados Americanos – OEA. Salvador/BA. 2004.

CHEHBOUNI, A. et al. A Coupled Hydrological and Ecological modeling Approach to examine the Relationship between Radiative and Aerodynamic Surface Temperature over Sparsely Vegetated Surfaces. **Remote Sensing Environment**. 1996a.

CHIN, D. A.; ZHAO, S. Evaluation of evaporation-pan networks. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, Jerusalem, v.121, n.5, p.338-346, 1995.

CONCEIÇÃO, F.G. **Estimativa da evapotranspiração de referência por dados de satélites e de estações meteorológicas para o Estado de Minas Gerais.**

Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Lavras. Lavras-MG. 61 p. 2013.

DA SILVA, D. F.; MOLION, L. C. B. **Influência da variabilidade climática interanual na hidrologia da bacia do rio são francisco.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Meteorologia), Universidade Federal de Alagoas–UFAL, 2003.

DA SILVA, D. F. et al. Variabilidade espacial das chuvas na Bacia do Rio São Francisco. **Anais.** II Encontro nordestino de Biogeografia, Maceió-AL, 2001.

DALEZIOS, N.R., LOUKAS, A., BAMPZELIS, D. Spatial variability of reference evapotranspiration in Greece. **Physics and Chemistry of the Earth**, 27 1031–1038, 2002.

DIAS, N.L.C. **Estimativas climatológicas de evaporação em lagos.** Dissertação (Mestrado) – Universidade federal do Rio de Janeiro, 1986. 175p.

DI ZIO, M.; GUARNERA, U. Semiparametric predictive mean matching. **AStA Advances in Statistical Analysis**, v. 93, n. 2, 2009. p. 175-186.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Crop water requirements.** Rome: FAO, 1977. (Irrigation and drainage paper, 24).

EUMETSAT. **MSG Level 1.5 Image Data Format Description.** Darmstadt, Germany, 2017.

FEDOROVA, N. **Meteorologia Sinótica.** V2, 242 págs, Editora e gráfica Universitária UFPel. 2001.

FEDOROVA, N. **Sinótica II: frentes, correntes de jatos, ciclones e anticiclones.** Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Maceió-AL, 169p. 2008.

FERNANDES, R.; KOROLEVYCH, V.; WANG, S. Trends in Land Evapotranspiration over Canada for the Period 1960-2000 based on In Situ Climate Observations and a Land Surface Model. **Journal of Hydrometeorology**, Vol. 8, 2007.

FONTES, A. S.; ALVARES, D.; MEDEIROS, Y. D. P. **Avaliação preliminar da evaporação nos açudes da bacia experimental do rio cedro.** São Luís: VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste (2004).

FONTES, A.S. Estudo da evaporação em reservatórios situados em região semi-árida: uso de **bacia experimental.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental e Urbana) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2005. 210 f.

GRISMER, M. E. et al. Pan evaporation to reference evapotranspiration conversion methods. **Journal of Irrigation Drainage Engineering**, New York, v. 128, n. 3, p. 180 - 184, 2002.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering Agriculture**. V.1. n.2. p.96-99, 1985.

HARRELL FE Jr. Regression Modeling Strategies: With Applications to Linear Models, Logistic Regression, And Survival Analysis. **Springer-Verlag**: New York; 2001.

HASTENRATH, S.; HELLER, L. Dynamics of Climatic Hazards in Northeast Brazil. **Quartely Journal Royal Meteorological Society**, 103 (435), 77-92, January. 1977.

HORTON N. J, LIPSITZ S. R. **Multiple imputation in practice: comparison of software packages for regression models with missing variables**. Am Stat 2001; 55:244-54.

HORTON, N. J., KLEINMAN, K.P. Much Ado About Nothing: A Comparison of Missing Data Methods and Software to Fit Incomplete Data Regression Models. **The American Statistician**, 2007. Vol. 61, No. 1, p.87.

IBAMA, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Projeto de Monitoramento do Desmatamento dos Biomas Brasileiros por Satélite**. 2010. Disponível em: <<http://siscom.ibama.gov.br/monitorabiomas/index.htm>>. Acesso em: 25 out. 2018.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). **Boletim Agroclimatológico Mensal de Abril**. 2010.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). **Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990**. 2019. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/graficosClimaticos> Acesso: 05 jan. 2019.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and irrigation water requeriments**. New York: ASCE, 1990. 332 p: Disponível em: www.scielo.br/pdf/eagri/v24n2/v24n2a11.pdf; Acesso em 20 jan. 2019.

KENWARD, M. G.; CARPENTER, J. Multiple imputation: current perspectives. **Statistical Methods in Medical Research**, v. 16, n. 3, p. 199-218, 2007.

KOHLER, M.A.; NORDENSEN, T.J.; FOX, W.E. **Evaporation from pans and lakes, U.S. Weather Bureau Research**, n. 38, p. 1-21, 1955. (Paper 38).

KOUSKY, V. E. Frontal influences on northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, 1979. v. 107, p.1140-1153. Disponível em: <[dx.doi.org/10.1175/1520-493\(1979\)107%3C1140:FIONB%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-493(1979)107%3C1140:FIONB%3E2.0.CO;2)>. Acesso em: 20 jan. 2019.

KOUSKY, V. E.; GAN, M. A. Upper tropospheric cyclones vortices in the tropical south atlantic. **Tellus**, 1981. v. 33, p. 538-551. DOI: <[dx.doi.org/10.1111/j.2153-3490.1981.tb01780.x](https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1981.tb01780.x)>. Acesso em: 20 jan. 2019.

LEÃO, R.A.O. et al. Estimativa da evaporação no açude Banabuiú, no Estado do Ceará, por diferentes métodos combinados, derivados da equação de Penman. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 1, p. 129-144, 2013.

LIANG, L.; Li, L.; LIU, Q. Temporal variation of reference evapotranspiration during 1961–2005 in the Taoer River basin of Northeast China. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.150, n.2, p.298-306. 2009.

LI, K. H.; RAGHUNATHAN, T. E.; RUBIN, D. B. Large-Sample Significance Levels from Multiply Imputed Data Using Moment-Based Statistics and an F Reference Distribution. **Journal of the American Statistical Association**, 86, 1065-1073. 1991.

LINACRE, E.T. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates using temperature data alone. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 8, p. 409-424, 1977.

MAJIDI et al. Estimating Evaporation from Lakes and Reservoirs under Limited Data Condition in a Semi-Arid Region. *Water Resour Manage*, (2015). An International Journal – Published for the **European Water Resources Association (EWRA)**. Volume 29. Number 10. *Water Resour Manage* (2015). 29:3711-3733.

MARENGO, J. A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do Brasil. **Parcerias estratégicas**, v. 13, n. 27, p. 149-176, 2008.

MARENGO, J.A.; CUNHA, A.P.; ALVES, L.M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Climanálise**, v.3, p.1-6, 2016.

MATINS, A. P. **Uso de dados do sensor MODIS/AQUA e do algoritmo SEBAL para estimativa da evapotranspiração real na bacia do rio Paraíba**. Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia/MG. 2015.

MASSON, V. et al. Global Database of Land Surface Parameters at 1-km Resolution in Meteorological and Climate Models. **J. Climate** 16(9), 1261-1282. 2003.

MEDEIROS, A. T. **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP, 2002. 103 f.

MELO, E. C. S. et al. Efeito da interação da convecção atmosférica com o desenvolvimento de brisas no estado da Paraíba. **Engenharia Ambiental (Online)**, v. 8, p. 298-314, 2011.

MENDONÇA, J. C. et al. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 7, n.2, p. 275- 279, 2003.

Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v7n2/v7n2a15.pdf> >. Acesso em 22 Nov. 2018.

MOLION, L. C. B., BERNARDO, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n. 1, p. 01-10, 2002.

MOLLE, F. Perdas por evaporação e infiltração em pequenos açudes. Série Brasil. SUDENE. **Hidrologia**. Recife, série.25, 1989. p. 11 A 70.

NEMUS, Gestão e Requalificação Ambiental Ltda. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. RP1A – Diagnóstico da Dimensão Técnica e Institucional**. Salvador – Bahia Volume 1 – Caracterização da bacia hidrográfica – 1ª parte. 2015..

NEMUS, Gestão e Requalificação Ambiental Ltda. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. RP1A – Diagnóstico da Dimensão Técnica e Institucional**. Salvador – Bahia. Volume 2 – Caracterização da bacia hidrográfica – 2ª parte. 2015.

OLIVEIRA, G. X. S. **Relações entre medidas de evaporação de superfícies de água livre por evaporímetros e estimativas por métodos meteorológicos em duas regiões do Estado de São Paulo**. Tese (Doutorado) da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba/SP 2009. 102 p.: il.

PEREIRA, A. R. **Introdução à micrometeorologia**. Piracicaba, SP: ESALQ. Departamento de Física e Meteorologia, 1998. 70 p.

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

PINHEIRO, M. A. B. **Evapotranspiração de referência com requerimento mínimo de dados para estações de Minas Gerais e adjacências** / Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias) - Universidade Federal de São João del-Rei, Sete Lagoas, 2017. 109 p.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Rev. Monthly Weather**. v.100, p.81-92. 1972.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria**. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. 2018. Acesso em: 20 jan. 2018.

REIS, R.J.; DIAS, N.L. **Multi-season lake evaporation: energy-budget estimates and CRLE model assessment with limited meteorological observations**. Journal of Hydrology, v. 208, p. 135-147, 1998.

RUBIN, D.B. **Multiple imputation for Nonresponse in Surveys**. John Wiley & Sons Inc., New York. 1987. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/9780470316696>>. Acesso em: 25 ago.2018.

RUBIN, D.B. **Multiple Imputation for Nonresponse in Surveys**. John Wiley & Sons Inc., New York. 2004.

SANTIAGO, A. V. **Evapotranspiração de referência medida por lisímetro de pesagem e estimada por Penman-Monteith (FAO-56), nas escalas mensal e decenal**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Universidade de São Paulo. Piracicaba. 2001. 37 p.

SANTOS, S. A. et al. Análise Estatística de Chuvas Intensas e Inundações no Semiárido da Bacia do Rio São Francisco: A Cheia de 1985. **Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal**, v. 7, p. 278-290, n. 3. 2010.

SCHAFER, J. L. *Analysis of Incomplete Multivariate Data*. London: Chapman and Hall. 1997. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1977.10480610>>

SCHAFER, J. L.; GRAHAM, J. W. **Missing data: our view of the state of the art**. **Psychological Methods**, v.7, n.2, p.147 - 177, 2002.

SENTELHAS, P.C. **Estimativa diária da evapotranspiração de referência com dados de estação meteorológica convencional e automática**. Tese apresentada à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. 1998.

SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 1 – 7, 1996. Disponível em: <http://www.sbagro.org.br/revistas/resumo_das_revistas_rba.pdf>.

SILVA, S. S. **Comparação de métodos empírico-teóricos de estimativa de evapotranspiração de referência ao modelo de Penman-Monteith**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, Goiânia, 2017.

SILVA, N. D. **Estimativa, análise espacial e temporal da evapotranspiração de referência (ET_o) na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, Brasil**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. Cruz das Almas, BA, 2017.

SILVA, H. J. F. **Análise de tendência e caracterização sazonal e interanual da evapotranspiração de referência para o sudoeste da Amazônia brasileira; Acre, Brasil**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2015.

SMITH, M. **Report on expert consultation on procedures for revision of FAO methodologies for crop water requirements**. Rome: FAO, 1991. 45p.

SMITH, M. The application of climatic data for planning and management of sustainable rainfed and irrigated crop production. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, n. 1, p. 99-108, 2000.

SOBRINHO, J.E. **Análise dos termos “aerodinâmico” e “balanço de energia” da equação de Penman, para Viçosa, MG. 1983. 86 f.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1983.

SUTCLIFFE, J. F. **As plantas e a água.** São Paulo: EPU. 1980. 126p.

TEIXEIRA, P. R. et al. Estudo comparativo dos componentes do balanço de radiação para um dia de céu claro e outro de céu parcialmente nublado na Amazônia. Congresso Brasileiro de Meteorologia. **Anais...**Fortaleza - CE: 2004

THORNTHWAITE, C.W.; WILM, H.G. **Report of the Commite on evapotranspiration and transpiration**, 1943-1944. Washington, D.C.: Transactions of the American Geophysical Union, 1944. p.686-693.

TRIGO, I. F. et al. The Satellite Application Facility on Land Surface Analysis. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, p. 2725-2744, 2011.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. **Meteorologia Descritiva: Fundamentos e Aplicações Brasileiras.** v. 01, 374 p., Livraria Nobel, Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - SP, 1980.

TUCCI, C. E. M. et al. **Hidrologia: Ciência e Aplicação.** 4ª.Edição. 4ª reimp. Porto Alegre/RS: Editora UFRGS/ABRH -2012.

TUCCI, C.E.M.; BELTRAME, L.F.S. **Evaporação e Evapotranspiração.** In: TUCCI, C.E.M. (Org.). Hidrologia: ciência e aplicação. 2 ed. Porto Alegre: Ed. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos; v.4). Universidade/UFRGS: ABRH, 2000. p. 253-287.

UVO, C. R. B. **A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação da Região Norte do Nordeste Brasileiro.** 1989. 81 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. (INPE-4887 - TDL/378).

VAN DEN HURK B.; VITERBO P.; BELJAARS A.; BETTS A. Offline validation of the ERA40 surface scheme. **ECMWF Technical Memorandum** No.295, 2000 42 p.

VAN BUUREN, S. **Groothuis-Oudshoorn K. mice: Multivariate Imputation by Chained Equations.** R package version 2.9. 2011. Disponível em: <<http://CRAN.R-project.org/package=mice>>.

VARDAVAS, I.M.; FOUNTOULAKIS, A. Estimation of lake evaporation from standard meteorological measurements: application to four Australian Lakes in difft climatic 144 regions. **Ecological Modelling**, v. 84, p. 139-150, 1996. Disponível em: Acesso em: 25 out. 2018.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia.** 2. ed., Pax gráfica e editora, 532 p., Brasília – DF, julho de 2001.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e Aplicações**. Viçosa – MG: Imprensa Universitária, 449p, 1991.

VIEIRA, N. P. A. **Estimativa da evaporação nos reservatórios de Três Marias-MG e Sobradinho-BA**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, MG, 2015.

WILKS, D. S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 2nd Edition **Academic Press**, London., 2006.

ZHANG T.et al. **A Global Perspective on Renewable Energy Resources: Nasa's Prediction of Worldwide Energy Resources (Power) Project**. In: Goswami D.Y., Zhao Y. (eds) *Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I – Vol. V)*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-75997-3_532>. Acesso em: 20 dez.2018.

APÊNDICE A – Quadro de preditores

Quadro de preditores do projeto Previsão dos Recursos Energéticos Mundiais
(Prediction of the Worldwide Energy Resources - POWER)

PREDITORES PARA IMPUTACAO							
GEOCOD	ESTACOES/ PREDITORES	UF	PRED N°		PONTO DE GRADE	LAT	LON
2601201	ARCO VERDE	PE				-8,423941	-37,056506
PREDITORES			Gr1	11		-7,992636	-37,441660
			Gr2	12		-7,992635	-36,941560
			Gr3	17		-8,492735	-37,441660
			Gr4	18		-8,492753	-36,941156
2700300	ARAPIRACA	AL				-9,755907	-36,657297
PREDITORES			Gr1	30		-9,492921	-36,941550
			Gr2	25		-9,492941	-36,441458
			Gr3	36		-9,993090	-36,941670
			Gr4	31		-9,993065	-36,441458
2800704	BREJO GRANDE	SE				-10,418943	-36,471820
PREDITORES			Gr1	36		-9,993090	-36,941670
			Gr2	31		-9,993065	-36,441458
			Gr3	42		-10,493120	-36,941550
			Gr4	37		-10,493136	-36,441454
2706406	PÃO DE AÇÚCAR	AL				-9,747042	-37,435139
PREDITORES			Gr1	29		-9,492977	-37,441639
			Gr2	30		-9,492921	-36,941550
			Gr3	35		-9,993230	-37,441540
			Gr4	36		-9,993090	-36,941670
2707107	PIRANHAS	AL				-9,623559	-37,750393
PREDITORES			Gr1	28		-9,493010	-37,941680
			Gr2	29		-9,492977	-37,441639
			Gr3	34		-9,993043	-37,941759
			Gr4	35		-9,993230	-37,441154
2805703	PROPRIÁ	SE				-10,208207	-36,842099
PREDITORES			Gr1	36		-9,993090	-36,941670
			Gr2	31		-9,993065	-36,441458
			Gr3	42		-10,493120	-36,941550
			Gr4	37		-10,493136	-36,441454
2709202	TRAIPIÚ	AL				-9,971059	-37,006006
PREDITORES			Gr1	29		-9,492977	-37,441639
			Gr2	30		-9,492921	-36,941550
			Gr3	35		-9,993230	-37,441540
			Gr4	36		-9,993090	-36,941670

Fonte: Autor (2019).

APÊNDICE B – Quadro Caracterização BHSF

Caracterização das regiões fisiográficas da Bacia do São Francisco com destaque para o Baixo São Francisco (BHSF-Bacia Hidrográfica do São Francisco, SF-São Francisco).

Região Fisiográfica Características	BHSF	Alto SF	Médio SF	Submédio SF	Baixo SF
População Residente (1.000)	14.298,0	7.156,9	3.453,9	2.274,7	1.412,5
População Residente Urbana (1.000)	11.045,2	6.788,1	2.130,0	1.374,9	752,2
População Residente Rural (1.000)	3.252,8	368,8	1.329,9	899,9	660,3
Municípios integrados na bacia (N°)	507	169	178	91	90
Área Total (km ²)	635.603	99.760	400.610	109.827	25.404
Área Urbana (km ²)	5.600	3.336	1.252	769	242
Área Urbanizada (%)	0,9	3,3	0,3	0,7	1,0
Área Rural (km ²)	630.002	96.424	399.358	109.058	25.162
Área Ruralizada (%)	99,1	96,7	99,7	99,3	99,0
Densidade Demográfica (hab./km ²)	22,5	71,7	8,6	20,7	55,6
Densidade Demog. Urbana (hab./km ²)	1.972,2	2.034,6	1.700,9	1.786,7	3.105,7
Densidade Demog. Rural (hab./km ²)	5,2	3,8	3,3	8,3	26,2
Taxa de Alfabetização – Total (%)	79,5	88,2	74,7	70,1	62,2
IDHM-Índice de Desenvolvimento Humano Municipal 2010 (0-1)	0,69	0,75	0,64	0,62	0,57
Abastecimento de Água (%)	84,1	94,5	76,4	71,3	64,0
Coleta de Esgoto (%)	57,3	82,3	22,9	45,2	18,1
Coleta de Resíduos (%)	80,6	95,2	63,4	65,8	63,5
*Comprimento rede drenagem(km)	121.657	24.539	67.926	23.479	5.713
Lavouras (%)	4,3	1,9	5,6	1,6	5,4
Matas e/ou Florestas (%)	9,7	5,4	11,7	7,9	2,4
Pastagens (%)	19,9	32,5	17,8	8,6	52,6
Estabelecimentos Agropecuários (%)	56,9	44,5	57,6	72,8	27,1

Fonte: NEMUS (2015) apud IBGE (2010 e 2015) & ANA (2014).