



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

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/03.30.15.03-TDI

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA
EFICIÊNCIA DE USO DA ÁGUA NA CAATINGA DO
SUBMÉDIO DO SÃO FRANCISCO POR MEIO DE
DADOS MODIS E MODELO METRIC**

Nildson Rodrigues de França e Silva

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelas Dras. Elisabete Caria
Moraes, e Magna Soelma Beserra
de Moura, aprovada em 08 de abril
de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3T34EBL>>

INPE
São José dos Campos
2019

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA N° 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



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

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/03.30.15.03-TDI

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA
EFICIÊNCIA DE USO DA ÁGUA NA CAATINGA DO
SUBMÉDIO DO SÃO FRANCISCO POR MEIO DE
DADOS MODIS E MODELO METRIC**

Nildson Rodrigues de França e Silva

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelas Dras. Elisabete Caria
Moraes, e Magna Soelma Beserra
de Moura, aprovada em 08 de abril
de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3T34EBL>>

INPE
São José dos Campos
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Si38v Silva, Nildson Rodrigues de França e.
Variabilidade espaço-temporal da eficiência de uso da água na Caatinga do Submédio do São Francisco por meio de dados MODIS e modelo METRIC / Nildson Rodrigues de França e Silva. – São José dos Campos : INPE, 2019.
xxix + 120 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/03.30.15.03-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.

Orientadoras : Dras. Elisabete Caria Moraes, e Magna Soelma Beserra de Moura.

1. Caatinga. 2. Fluxos de carbono. 3. Fluxos de água. 4. Balanço de energia. 5. MODIS. I.Título.

CDU 528.8:581.526.53



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

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

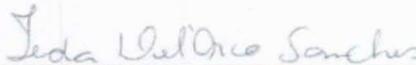
Aluno (a): **Nildeon Rodrigues de França e Silva**

Título: "VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA EFICIÊNCIA DE USO DA ÁGUA NA CAATINGA DO SUBMÉDIO DO SÃO FRANCISCO POR MEIO DE DADOS MODIS E MODELO METRIC"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em

Sensoriamento Remoto

Dra. Ieda Del' Arco Sanches



Presidentes / INPE / São José dos Campos - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dra. Elisabete Caria Moraes



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dra. Magna Soelma Beserra de Moura

Orientador(a) / EMBRAPA SEMIÁRIDO / Petrolina - PE

() Participação por Vídeo - Conferência

() Aprovado () Reprovado

Dr. Bruno Silva Oliveira



Convidado(a) / Galvota Sis.Intelig. / São Paulo - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. Gabriel de Oliveira



Convidado(a) / Univ. do Kansas / Kansas - USA

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 08 de abril de 2019

“Education is the great engine of personal development. It is through education that the daughter of a peasant can become a doctor, that the son of a mineworker can become the head of the mine, that a child of farmworkers can become the president of a great nation. It is what we make out of what we have, not what we are given, that separates one person from another”.

Nelson Mandela – A Long Walk to Freedom

*Dedico esta Dissertação de Mestrado a meus pais Josenildo e Maria do Carmo,
e a minha irmã Nícia.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado a oportunidade de ter sido aprovado no INPE e a sabedoria necessária para superar os momentos difíceis.

A meus pais, Josenildo e Maria do Carmo, e a minha irmã Nícia pelo amor, exemplo, ensinamentos e incentivos que sempre me deram.

À minha orientadora Dra. Elisabete Caria Moraes pela amizade, confiança, bons conselhos, excelente orientação e todo apoio que me deu ao longo do mestrado.

À Dra. Magna Soelma Beserra de Moura pela orientação, disponibilização dos dados de superfície e mesmo tão ocupada ter conseguido acompanhar eu e a Bete durante uma semana em campo. Também gostaria de agradecer a Herica Fernanda de Sousa Carvalho por ter tirado minhas dúvidas com relação aos dados utilizados e equipamentos das torres micrometeorológicas, e ter me disponibilizado parte dos dados de superfície.

Aos amigos Dr. Gabriel de Oliveira, Dr. Bruno Silva Oliveira e Guilherme Mataveli que desde o início deste trabalho sempre me ajudaram quando precisei, mesmo a distância.

Aos orientadores que tive ao longo da graduação Dr. Hernande Pereira da Silva, Dr. Alexandre Hugo Cezar Barros e Dr. Javier J. Cancela pela amizade, bons exemplos e pela orientação que me deram.

I would like to thank Dr. Nathaniel A. Brunzell, for his suggestions in the paper of this dissertation and in the analysis of my results.

Ao professor Dr. Camillo Daleles Rennó e a Dra. Gabriela Paola Ribeiro Banon pela ajuda na estatística.

Ao pessoal do Laboratório de Meteorologia da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF) pela disponibilização dos dados meteorológicos e pela boa vontade que sempre tiveram em ajudar. Como também a equipe de geoprocessamento da Agência Nacional de Águas (ANA).

Aos engenheiros agrônomos Robson Castro da fazenda Vale das Uvas e Reginaldo da Ibacem Agrícola Comércio e Exportação, pela disponibilidade em me receber e apresentar as áreas comerciais de uva e manga de cada fazenda que foi utilizada neste estudo.

A todos os amigos do INPE pelos momentos de descontração e apoio em diferentes etapas deste trabalho; em especial ao pessoal do ASA 35 pelo convívio diário e que sentirei falta.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro em forma de bolsa de estudo e à Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo suporte financeiro ao projeto Caatinga - FLUX Fase 2 (Processo número: APQ 0062-1.07/15).

RESUMO

A bacia hidrográfica do São Francisco abrange cerca de 645.000 km², o que representa 8% do Brasil. Desse território, as sub-bacias das Garças, Pontal e Curaçá que abrangem parte dos estados da Bahia e Pernambuco contidas no Submédio do São Francisco e no bioma da Caatinga são conhecidas pela presença agricultura irrigada, em especial, a fruticultura. Muitas das áreas de agricultura irrigada foram instaladas em áreas de vegetação nativa, devido à maior demanda hídrica dos cultivos irrigados, o que pode causar alterações nos fluxos de água como também nos fluxos de carbono e energia na região. Diante disso, este estudo buscou compreender como as mudanças de uso e cobertura da terra influenciam nos fluxos de água e carbono, na temperatura de superfície e albedo da superfície através da utilização dos produtos MODIS e o modelo METRIC (*Mapping Evapotranspiration with High Resolution and Internalized Calibration*). Os produtos utilizados foram: MCD43A3 (albedo), MCD43A4 (reflectância de superfície ao nadir), MOD11A1 (temperatura de superfície), MOD15A2H (índice de área foliar), MOD13A1 (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI), MOD16A2 (evapotranspiração – ET), MOD17A2H (produtividade primária bruta – GPP) e MOD44W (máscara de águas continentais). Através de imagens do sensor OLI/Landsat-8 provenientes da plataforma do *Google Earth Engine* foi realizado um mapeamento por inspeção visual das classes de uso e cobertura da terra para extração dos perfis. Além destes dados, foram utilizadas imagens do produto 3B43 do TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) de precipitação acumulada, o produto de cobertura da terra do MapBiomas versão 3.0 e o modelo digital de elevação GMTED2010. O METRIC foi utilizado na obtenção da ET_a, alguns de seus sub-produtos foram utilizados como entrada na modelagem da GPP e posterior obtenção da eficiência de uso da água (WUE). No processo de validação os produtos gerados foram comparados com dados de torres micrometeorológicas, cujo resultado mostrou que não recomenda-se utilizar a WUE obtida a partir dos produtos MODIS (MOD17A2H/MOD16A2) como também o MOD15A2H e o MOD16A2 para estudar os valores obtidos, no entanto, o penúltimo podem ser utilizados em estudos de tendência. Entre os produtos MODIS recomenda-se a utilização do MCD43A3 e do MOD11A1. Os produtos derivados do METRIC apresentaram os melhores resultados sendo recomendados para estudos dos fluxos de água e carbono, porém deve-se atentar para a etapa de calibração do modelo, que é essencial para a obtenção de bons resultados. Quanto ao comportamento dos fluxos na região de estudo observou-se que as áreas de Caatinga e pastagem por não serem irrigadas apresentaram uma forte dependência das chuvas da região diferente das áreas de agricultura irrigada que mantiveram o comportamento constante ao longo do ano. As áreas de Caatinga e pastagem, mesmo passando por um período de baixas precipitações durante os meses de junho/2015 e de dezembro/2015 conseguiram apresentar altos valores de NDVI e WUE após eventos de precipitações de janeiro/2016. As áreas de agricultura irrigada apresentaram altos valores de GPP e WUE durante todo o ano.

Palavras-chave: Caatinga. Fluxos de carbono. Fluxos de água. Balanço de Energia. MODIS.

**SPATIO-TEMPORAL VARIABILITY OF THE WATER-USE EFFICIENCY IN
THE CAATINGA OF THE LOWER-MIDDLE SÃO FRANCISCO RIVER BASIN
USING MODIS DATA AND THE MODEL METRIC**

ABSTRACT

The São Francisco River basin covers an area of 645.000 km² corresponding to 8% of Brazilian territory. Located in the Lower-Middle part of São Francisco River basin and in the biome of *Caatinga*, the Garças, the Pontal and the Curaçá river sub-basins are known for the strong irrigated agriculture, especially, the fruticulture. Many of those irrigated areas were implemented in natural vegetation areas. Due to the higher water demand, it can have changes in the water fluxes, as also in the carbon and energy fluxes. Therefore, the aim of this study was to evaluate how landcover and land use change impacts in the carbon and water fluxes, as also in the land surface temperature and surface albedo, using MODIS dataset and the algorithm METRIC (Mapping Evapotranspiration with High Resolution and Internalized Calibration). The used dataset were: MCD43A3 (albedo), MCD43A4 (nadir adjusted reflectance), MOD11A1 (land surface temperature), MOD15A2H (leaf area index), MOD13A31 (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI), MOD16A2 (evapotranspiration – ET), MOD17A2H (gross primary productivity – GPP) and MOD44W (land water mask). The landcover and land use was mapped by visual inspection the main use and land cover in the area to extract the temporal profiles using images from OLI/Landsat-8 availables at Google Earth Engine. There was used the cumulative precipitation images from the TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) data set 3B43, the landcover product MapBiomas version 3.0 and the elevation digital model GMTED2010. After applied the model METRIC to obtain ET_a, some of the METRIC sub-products were used as input to generate the GPP and after the water-use efficiency (WUE). After the validation of the generated products using data from micrometeorology towers, we not recommended using WUE from the ratio between the MODIS products (MOD17A2H/MOD16A2), as also MOD15A2H and MOD16A2 to study the pixel values, but the penultimate can be used to study the trends. Among the MODIS products, it is recommended to use MCD43A3 and MOD11A1. The products derived from METRIC showed the best results. These products are recommend in studies about carbon and water fluxes, but it is necessary to pay attention to the algorithm calibration of the algorithm to obtain good results. About the behaviour of the studied fluxes in the study area, it was observed a strong dependence of the *Caatinga* vegetation and pasture areas to the rainfall periods. Differently of irrigated areas, which presented a constant behaviour during the time. The *Caatinga* vegetation and pasture areas, even suffered a period of lower rainfall events in a period between June/2015 and December/2015 showed high values of NDVI and WUE after the precipitation events from January/2016. The irrigated areas showed high values of GPP and WUE during the whole year.

Keywords: Caatinga. Carbon fluxes. Water fluxes. Energy balance. MODIS.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Percentual de outorgas vigentes emitidas pela ANA até 2019 para o Submédio do São Francisco.	6
Figura 2.2 – Esquema do balanço de energia da superfície.	13
Figura 3.1 – Localização da área de estudo.....	20
Figura 3.2 – Mapa de elevação para área de estudo obtido a partir do GMTED 2010.	20
Figura 3.3 – Mapa de cobertura da terra do MapBiomas versão 3.0 (PROJETO MAPBIOMAS, [s.d.]) para área de estudo em 2017.....	21
Figura 3.4 – Evolução da área plantada (ha) no Polo de Desenvolvimento Petrolina-Juazeiro entre 2001 e 2017 para os cultivos de banana, cana-de-açúcar, feijão, manga e uva	22
Figura 3.5 – Fotografias da torre micrometeorológica no sítio CTP e da vegetação.....	24
Figura 3.6 – Perfil temporal médio do NDVI, do produto de reflectância MCD43A4, de <i>buffer</i> com 1 km ² a partir do centro da torre para os períodos estudados no sítio CTP. As linhas verticais indicam o desvio padrão.....	24
Figura 3.7 – Localização dos <i>buffers</i> de 1 km ² a partir do centro das torres utilizadas.	25
Figura 3.8 – Fenologia da cana-de-açúcar no sítio CAN durante o período do experimento.	26
Figura 3.9 – Perfil temporal médio do NDVI, do produto de reflectância MCD43A4, em <i>buffer</i> de 1 km ² a partir do centro da torre para os períodos estudados no sítio CAN. As linhas verticais indicam o desvio padrão.....	26
Figura 4.1 – Fluxograma das principais etapas da metodologia.	27
Figura 4.2 – Localização das coberturas mapeadas.	43
Figura 4.3 – Fotografias da área de manga da Ibacem Agrícola Comércio e Exportação em julho de 2018.....	43

Figura 4.4 – Fotografias da área de uva de mesa da Fazenda Vale das Uvas em julho de 2018.....	44
Figura 4.5 – Localização dos <i>pixels</i> utilizados na etapa de validação.....	45
Figura 5.1 – Balanço hídrico para o solo exposto, feito pelo modelo descrito por Allen et al. (2006) para a estação meteorológica situada em Petrolina/PE.	47
Figura 5.2 – Comparação entre o IAF estimado (MOD15A2H e METRIC) e observado nos sítios experimentais CTP e CAN.	50
Figura 5.3 – Perfil temporal do IAF estimado pelo METRIC para os sítios experimentais (CTP e CAN) durante os períodos utilizados para o processo de validação.....	51
Figura 5.4 – Comparação entre o albedo observado (α_{Obs}) e o albedo estimado (α_{MODIS}) nos sítios experimentais CTP e CAN.....	53
Figura 5.5 – Perfil temporal do albedo MODIS para os sítios experimentais (CTP e CAN) durante os períodos utilizados para o processo de validação.....	54
Figura 5.6 – Comparação entre a temperatura observada e o LST no sítio experimental CTP.....	55
Figura 5.7 – Perfil temporal da LST MODIS no sítio experimental CTP durante o período utilizado para o processo de validação.	56
Figura 5.8 – Comparação entre a ET_a acumulada estimada (MOD16A2 e METRIC) e a acumulada observada nos sítios experimentais CTP e CAN para 8 dias.....	58
Figura 5.9 – Comparação entre a ET_a estimada (MOD16A2 e METRIC) e observada nos sítios experimentais CTP e CAN.	60
Figura 5.10 – Perfil temporal da ET_a diária estimada pelo METRIC para os sítios experimentais (CTP e CAN) durante os períodos utilizados para o processo de validação.	62
Figura 5.11 – Comparação entre a WUE estimada (B.A.METRIC e MODIS) e observada no sítio experimental CTP.	64
Figura 5.12 – Perfil temporal da $WUE_{B.A.METRIC}$ para o sítio experimental CTP durante os períodos utilizados para o processo de validação. ...	65

Figura 5.13 – Médias mensais de precipitação considerando os anos de 2011, 2012, 2015 e 2016.	68
Figura 5.14 – Médias mensais da temperatura de superfície considerando os anos de 2011, 2012, 2015 e 2016. A área em destaque apresenta uma forte agricultura irrigada.	69
Figura 5.15 – Médias mensais de NDVI considerando os anos de 2011, 2012, 2015 e 2016. A área em destaque apresenta uma forte agricultura irrigada.	70
Figura 5.16 – Médias mensais de albedo considerando os anos de 2011, 2012, 2015 e 2016.	71
Figura 5.17 – Médias mensais para ET_a considerando os anos de 2011, 2012, 2015 e 2016.	75
Figura 5.18 – Médias mensais para $GPP_{B.A.}$ diária considerando os anos de 2011, 2012, 2015 e 2016. A área em destaque apresenta uma forte agricultura irrigada.	76
Figura 5.19 – Médias mensais para $WUE_{B.A.METRIC}$ diária considerando os anos de 2011, 2012, 2015 e 2016. A área em destaque apresenta uma forte agricultura irrigada.	77
Figura 5.20 – Média zonal da precipitação acumulada mensal em cada uso e cobertura da terra mapeado proveniente do produto 3B43 do TRMM para o período de junho/2015 até maio/2016.	78
Figura 5.21 – Média zonal do NDVI para cada uso e cobertura da terra mapeado para o período de junho/2015 até maio/2016.	79
Figura 5.22 – Média zonal da ET_a para os principais tipos de uso e cobertura da terra da área de estudo para o período de junho/2015 até maio/2016.	83
Figura 5.23 – Média zonal da $GPP_{B.A.}$ para os principais tipos de uso e cobertura da terra da área de estudo para o período de junho/2015 até maio/2016.	85
Figura 5.24 – Média zonal da $WUE_{B.A.METRIC}$ para os principais tipos de cobertura da terra da área de estudo para o período de junho/2015 até maio/2016.	86

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 4.1 – Especificações dos sensores e variáveis utilizadas nos sítios CTP e CAN.....	28
Tabela 4.2 – Dados do sensor MODIS utilizados.....	30
Tabela 5.1 – Acurácia do IAF estimado pelo MOD15A2H e pelo modelo METRIC para os sítios experimentais CTP e CAN.	49
Tabela 5.2 – Acurácia do albedo (α) estimado para os sítios experimentais CTP e CAN.....	52
Tabela 5.3 – Acurácia da LST estimada para o sítio experimental CTP.	55
Tabela 5.4 – Acurácia do acumulado da ET_a estimada pelo MOD16A2 e pelo modelo METRIC para os sítios experimentais CTP e CAN.....	57
Tabela 5.5 – Acurácia da ET_a estimada pelo MOD16A2 e pelo modelo METRIC para os sítios experimentais CTP e CAN.	59
Tabela 5.6 – Acurácia da WUE estimada no sítio experimental CTP.....	64
Tabela 5.7 – Resultado do teste não paramétrico de Mann-Whitney (peso significativo a 5%) para os perfis temporais de ET_a , $GPP_{B.A.}$, $WUE_{B.A.METRIC}$ e NDVI para o período de junho/2015 e maio/2016. A letra D significa diferentes (valor-p < 0,05) e a letra I significa iguais (valor-p > 0,05).	81

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Agrovale	Empresa Agroindústrias do Vale do São Francisco
AL	Alagoas
ANA	Agência Nacional de Águas
AOD	Profundidade óptica atmosférica / <i>Aerosol optical depth</i>
APAR	Radiação fotossinteticamente absorvida / <i>Absorbed photosynthetically active radiation</i>
ASTER	<i>Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
BA	Bahia
BHSF	Bacia Hidrográfica do São Francisco
BSA	<i>Blue-sky albedo</i>
BPLUT	<i>Biome Properties Look-Up Table</i>
BRDF	<i>Bidirectional Reflectance Distribution Function</i>
BSA	<i>Black-sky albedo</i>
CAN	Cana-de-açúcar
CASA	<i>Carnegie-Ames-Stanford Approach</i>
CE	Ceará
CFLUX	<i>Carbon Cycle Model</i>
C-Fix	<i>Parametric Production Efficiency Model</i>
CIMEC	<i>Calibration Using Inverse Modeling at Extreme Conditions</i>
CO ₂	Dióxido de carbono
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CTP	Caatinga preservada
DP	Desvio padrão
DJ	Dia juliano
EEFlux	<i>The Earth Engine Evapotranspiration Flux</i>
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ET	Evapotranspiração / <i>Evapotranspiration</i>
EUA	Estados Unidos da América
EVI	<i>Enhanced Vegetation Index</i>
FE	Fração evaporativa
FLD	Fração de luz difusa

FPAR	Fração da radiação fotossinteticamente absorvida / <i>Fraction of photosynthetically active radiation</i>
GEE	<i>Google Earth Engine</i>
GMAO	<i>Global Modeling and Assimilation Office</i>
GMT	<i>Greenwich Mean Time Zone</i>
GMTED2010	<i>Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010</i>
GPP	Produtividade primária bruta / <i>Gross primary productivity</i>
IAF	Índice de área foliar
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
JAXA	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
L4C	<i>Level 4 Carbon</i>
LABMET	Laboratório de Meteorologia
LST	Temperatura de superfície / <i>Land surface temperature</i>
LSWI	<i>Land Surface Water Index</i>
MDE	Modelo digital de elevação
METRIC	<i>Mapping Evapotranspiration with High Resolution and Internalized Calibration</i>
MG	Minas Gerais
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MRE	Erro relativo médio / <i>Mean relative error</i>
MSI	<i>Multispectral Imager</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NEE	Fluxo líquido de CO ₂ do ecossistema / <i>Net Ecosystem CO₂ Exchange</i>
NEP	Produtividade líquida do ecossistema / <i>Net Ecosystem Production</i>
NGA	<i>National Geospatial-Intelligence Agency</i>
NPP	Produtividade primária líquida / <i>Net primary productivity</i>
NPV	Vegetação fotossinteticamente não absorvida / <i>Non-photosynthetically active vegetation</i>
OLCI	<i>Ocean and Land Colour Instrument</i>
OLI	<i>Operational Land Imager</i>
PAR	Radiação fotossinteticamente ativa incidente / <i>Photosynthetically active radiation</i>
PAR _b	Radiação fotossinteticamente ativa incidente abaixo do dossel /

	<i>Below canopy PAR</i>
PAR _t	Radiação fotossinteticamente ativa incidente acima do dossel / <i>Above canopy PAR</i>
PAV	Vegetação fotossinteticamente absorvida / <i>Photosynthetic active vegetation</i>
PB	Paraíba
PE	Pernambuco
PI	Piauí
PIB	Produto Interno Bruto
r	Coefficiente de correlação de Pearson / <i>Pearson correlation coefficient</i>
R ²	Coefficiente de determinação / <i>Coefficient of determination</i>
RMSE	Raíz do erro médio quadrático / <i>Root mean square error</i>
RN	Rio Grande do Norte
RUE	Eficiência de uso da radiação / <i>Radiation use efficiency</i>
SAVI	<i>Soil Adjusted Vegetation Index</i>
SE	Sergipe
SEBAL	<i>Surface Energy Balance Algorithm for Land</i>
SEBS	<i>Surface Energy Balance System</i>
SMAP	<i>Soil Moisture Active Passive</i>
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
TGR	<i>Temperature and Greenness Rectangle Model</i>
TM	<i>Thematic Mapper</i>
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>
UA	Unidades astronômicas
UNCCD	<i>United Nations Convention to Combat Desertification</i>
UNIVASF	Universidade Federal do Vale do São Francisco
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
VPD	Déficit de pressão de vapor / <i>Vapor pressure deficit</i>
VPM	<i>Vegetation Photosynthesis Model</i>
WSA	<i>White-sky albedo</i>
WUE	Eficiência de uso da água / <i>Water-use efficiency</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

C_p	Constante do calor específico do ar
d_r	Distância relativa Terra-Sol
dT	Diferença de temperatura entre a superfície e a atmosfera
e_{real}	Pressão real de vapor
e_{sat}	Pressão de saturação do vapor de água
ET	Evapotranspiração
ET_a	Evapotranspiração real diária
ET_c	Evapotranspiração da cultura
ET_{inst}	Evapotranspiração instantânea
ET_o	Evapotranspiração de referência para gramíneas
ET_r	Evapotranspiração de referência para alfafa
G	Fluxo de calor no solo
G_{sc}	Constante solar
H	Fluxo de calor sensível
h	Altura média da vegetação ao redor da estação meteorológica
k	Constante de von Karman
K_c	Coefficiente de cultura
K_e	Coefficiente de evaporação
K_i	Irradiância solar incidente na superfície
K_r	Irradiância solar incidente na superfície refletida
L	Constante de ajuste do SAVI
LE	Fluxo de calor latente
$L_{w\downarrow}$	Radiação infravermelha termal emitida pela atmosfera
$L_{w\uparrow}$	Radiação infravermelha termal emitida pela superfície
P	Pressão atmosférica
R_a	Respiração autotrófica
r_{ah}	Resistência aerodinâmica para transporte de calor
R_e	Respiração do ecossistema
R_h	Respiração heterotrófica
R_n	Saldo de radiação na superfície
T_{ar}	Temperatura média do ar
T_{otm}	Temperatura ótima

T_s	Temperatura de superfície
u	Velocidade do vento
u_{2m}	Velocidade do vento a 2 m de altura
u^*	Velocidade de fricção do vento
z	Elevação do terreno
Z_{om}	Coeficiente de rugosidade da superfície
α	Albedo da superfície
α_{bs}	<i>Black-sky</i> albedo
α_{ws}	<i>White-sky</i> albedo
ϵ	Eficiência de uso da radiação
ϵ_a	Emissividade atmosférica
$\epsilon_{m\acute{a}x}$	Eficiência máxima do uso da luz
ϵ_s	Emissividade de superfície
θ	Ângulo solar zenital
λ	Calor latente de vaporização da água
λ_{AOD}	Profundidade óptica atmosférica
ρ	Densidade do ar
ρ_t	Reflectância
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
τ	Transmitância atmosférica
$S(\theta, \tau(\lambda_{AOD}))$	Fração de luz difusa
Δ	Declividade da curva de pressão de vapor de saturação
γ	Coeficiente psicrométrico

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Hipótese	2
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo geral.....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 A exploração da água na bacia do São Francisco	5
2.2 O Semiárido brasileiro.....	7
2.2.1 O bioma da Caatinga.....	8
2.3 Mudanças de uso e cobertura da terra.....	8
2.3.1 Mudança de uso no bioma da Caatinga	9
2.4 Evapotranspiração (ET), produtividade primária bruta (GPP) e eficiência de uso da água (WUE)	10
2.4.1 ET	10
2.4.2 GPP e WUE.....	11
2.5 Sensoriamento remoto para estimativa da ET e GPP.....	12
2.5.1 ET	12
2.5.2 GPP	16
3 ÁREA DE ESTUDO	19
3.1 Torres micrometeorológicas	23
4 MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1 Dados micrometeorológicos	27
4.2 Dados de IAF	28
4.3 Dados orbitais	28
4.3.1 Dados TRMM.....	28
4.3.2 Dados GMTED2010	29

4.3.3	Dados MODIS.....	30
4.4	Implementação do METRIC	33
4.4.1	Seleção dos <i>pixels</i> âncora.....	38
4.5	Obtenção da GPP	40
4.6	Obtenção da WUE	41
4.7	Dados de uso e cobertura da terra.....	42
4.8	Análises estatísticas.....	45
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1	Balanço hídrico do solo exposto	47
5.2	Validação dos produtos MODIS, METRIC e WUE	48
5.2.1	IAF	48
5.2.2	Albedo da superfície	52
5.2.3	Temperatura da superfície.....	54
5.2.4	Evapotranspiração real.....	56
5.2.5	WUE	63
5.3	Distribuição espacial da precipitação, temperatura de superfície, NDVI e albedo	65
5.4	Distribuição espacial dos fluxos de carbono e água	72
5.5	Comportamento dos fluxos de água e carbono em diferentes tipos de uso e cobertura da terra	78
6	CONCLUSÃO	87
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92

1 INTRODUÇÃO

A Bacia Hidrográfica do São Francisco (BHSF) é a terceira maior bacia hidrográfica do Brasil sendo a única totalmente contida no território brasileiro abrangendo cerca de 8% da área do País. Devido ao seu tamanho e para fins de planejamento a bacia foi dividida em quatro regiões: Alto São Francisco, Médio São Francisco, Submédio do São Francisco e Baixo São Francisco. Cada sub-bacia da região apresenta suas peculiaridades e diferentes usos dos recursos hídricos (LIMA et al., 2001). A BHSF é marcada por disparidades socioeconômicas e seus cursos d'água têm como principal fonte de poluição os esgotos domésticos, as atividades de mineração e agropecuárias (BRASIL, 2006, 2016). A vegetação natural de grande parte da BHSF é típica do bioma da Caatinga, importante ecossistema brasileiro apresentando mais de 2.000 espécies de plantas e animais, porém é pouco preservado visto que grande parte do mesmo já foi alterado pelo homem (DA SILVEIRA et al., 2018; LEAL et al., 2005). Com grande parte da sua extensão na região semiárida do Brasil, o bioma da Caatinga apresenta baixa nebulosidade, altas temperaturas médias e taxas de evaporação, e baixos índices pluviométricos (OLIVEIRA et al., 2006).

Dentro do Submédio do São Francisco e totalmente inserido na região Semiárida do Brasil, existe o Polo de Desenvolvimento Petrolina-Juazeiro, que é formado por oito municípios: Petrolina, Lagoa Grande, Santa Maria da Boa Vista e Orocó localizados no estado de Pernambuco (PE); e por Juazeiro, Sobradinho, Casa Nova e Curaçá na Bahia (BA). O desenvolvimento da região está fortemente ligado a agricultura irrigada, com destaque para a fruticultura, que se desenvolve devido aos perímetros irrigados instalados nessa região. A implantação dos perímetros irrigados do Semiárido ocorreu em algumas áreas onde a vegetação nativa foi suprimida.

Devido à demanda hídrica dos cultivos irrigados serem superiores a dos ecossistemas naturais na região, pode haver redução nos fluxos dos rios, variações na quantidade de biomassa, como também alterações no balanço de energia, provocando, assim, alterações nos fluxos carbono e de água (SÁ et al., 2010; TEIXEIRA et al., 2009). Ainda não se tem um aprofundado

conhecimento sobre os fluxos de carbono, água e energia na região Semiárida do bioma da Caatinga, quando comparado com outros biomas brasileiros, como por exemplo, Cerrado e Amazônia. Por isso é de grande importância estudar a dinâmica destes fluxos nas áreas de vegetação da Caatinga e como a retirada da vegetação natural impacta este bioma, visto que é uma região vulnerável as mudanças climáticas (SILVA et al., 2017).

Uma das formas de estudar os fluxos de carbono e água é através da eficiência de uso da água (*Water-Use Efficiency*, WUE). WUE refere-se ao carbono fixado por unidade de água utilizada num ecossistema podendo ser obtido pela razão entre a produtividade primária bruta (*Gross Primary Productivity*, GPP) e a evapotranspiração (ET) (DE OLIVEIRA et al., 2017; LU; ZHUANG, 2010; TANG et al., 2015). Em um cenário global de mudanças climáticas e degradação ambiental o maior entendimento da variável WUE é de grande importância para um melhor manejo dos ecossistemas (ITO; INATOMI, 2012).

Neste cenário, o sensoriamento remoto surge como uma importante ferramenta, por permitir estimar a ET, GPP e WUE com grande cobertura espaço-temporal, de forma rápida e com menores custos quando comparado com medidas de superfície convencionais. A maioria dos estudos de obtenção da ET, GPP e WUE através de sensoriamento remoto utilizam dados provenientes dos sensores: *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS/Terra e Aqua), *Thematic Mapper* (TM/Landsat-5), *Operational Land Imager* (OLI/Landsat-8), *Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER/Terra) e, mais recentemente, os sensores *Multispectral Imager* (MSI/Sentinel-2) e *Ocean and Land Colour Instrument* (OLCI/Sentinel-3) (DE OLIVEIRA et al., 2018; MA et al., 2012; SILVA et al., 2013; VANIKIOTIS et al., 2018; ZHUANG; WU, 2015).

1.1 Hipótese

A substituição da vegetação natural por áreas de pastagem e de agricultura irrigada pode impactar nos fluxos de carbono e água, que podem ser avaliados pela eficiência de uso da água obtida por sensoriamento remoto.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a dinâmica espaço-temporal dos fluxos de carbono e água em três sub-bacias localizadas no Submédio da Região Hidrográfica do São Francisco, como também os impactos causados pelos diferentes tipos de uso e cobertura da região nestes fluxos, por meio de dados do sensor MODIS e o algoritmo METRIC.

1.2.2 Objetivos específicos

Para cumprimento do objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar a acurácia dos produtos MODIS para temperatura de superfície (MOD11A1), evapotranspiração (MOD16A2), albedo da superfície (MCD43A3) e índice de área foliar (IAF) (MOD15A2H) no bioma da Caatinga através de medidas obtidas em superfície por meio de sensores acoplados em torres micrometeorológicas;
- b) Comparar os produtos de IAF e ET_a obtidos a partir do modelo METRIC utilizando dados MODIS com medidas oriundas de superfície por meio de sensores acoplados em torres micrometeorológicas;
- c) Estimar a WUE nas sub-bacias do Submédio do Vale do São Francisco a partir da razão entre a GPP e ET, utilizando os produtos MODIS MOD17A2H e MOD16A2, como também a ET_a oriunda do METRIC e a GPP obtida da metodologia de Bastiaanssen e Ali (2003) validando-os com as informações de torre de fluxo;
- d) Analisar a distribuição espaço-temporal dos fluxos de carbono e água nas sub-bacias do Submédio do Vale do São Francisco.

e) Avaliar os fluxos de carbono e água nos principais tipos de uso e cobertura da terra entre os meses secos e chuvosos na região de estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 A exploração da água na bacia do São Francisco

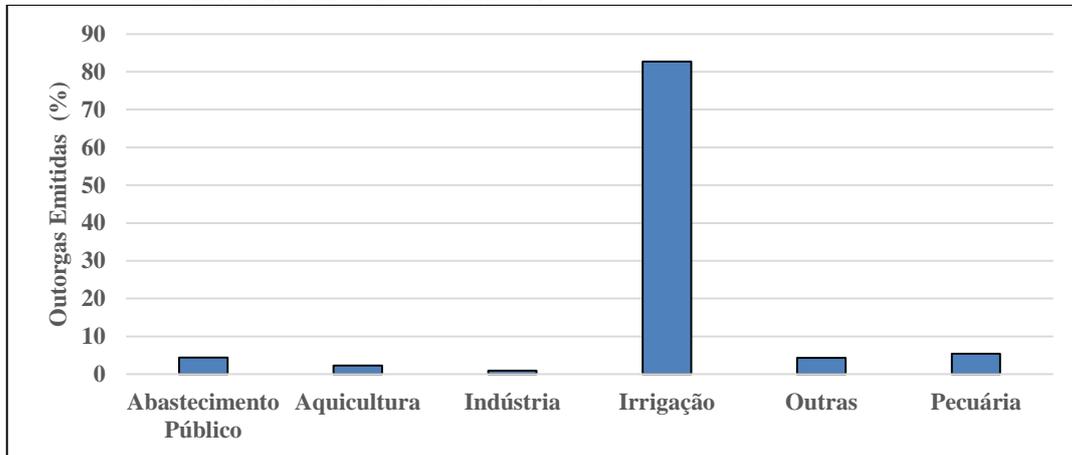
A BHSF tem uma extensão de 2.863 km e área de mais de 639.219 km², integrando 507 municípios dos estados de Minas Gerais, Goiás, Bahia, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e o Distrito Federal (CBHSF, 2016; BRASIL, 2016). A bacia é de grande importância para a região Nordeste do país, visto que apenas 3% de toda água existente no Brasil encontra-se nesta região. Destes 3%, 63% estão localizados na BHSF e 15% na bacia do rio Parnaíba (BRITO et al., 2007). A BHSF abrange 57% da região Semiárida do Brasil, compreendendo os biomas da Caatinga, Cerrado e Mata Atlântica (CBHSF, 2016; SUDENE, 2018).

De acordo com Zellhuber e Siqueira (2007) a maior demanda de água na BHSF é proveniente da irrigação que se concentra no Médio e Submédio do São Francisco. Miranda (2017) comenta que atualmente no Submédio do São Francisco existem 27 perímetros irrigados abrangendo uma área de cerca de 283 mil ha, sendo que ainda existem mais oito perímetros em implantação que compreenderão uma área de 1.842 ha. Os municípios de Petrolina e Juzeiro apresentaram um elevado desenvolvimento econômico desde a construção da barragem de Sobradinho, que possibilitou o desenvolvimento da fruticultura irrigada na região. O Alto São Francisco apresenta um forte setor agrícola junto ao Médio São Francisco e também uma alta atividade industrial, os quais fazem uso dos recursos hídricos da bacia (LIMA et al., 2001; BRASIL, 2016). A bacia ainda se destaca pela geração de energia, apresentando 33 hidrelétricas em operação, sendo nove no próprio São Francisco com destaque para a de Três Marias (MG), Sobradinho (BA), Luiz Gonzaga (PE), Moxotó (AL), Paulo Afonso (BA) e Xingó (AL/SE), sendo a base do suprimento de energia elétrica da região Nordeste proveniente do rio São Francisco (CASTRO; PEREIRA, 2017).

A Figura 2.1 mostra que, até 2019, de um total de 5.516 outorgas emitidas e vigentes pela Agência Nacional de Águas (ANA) os 3 maiores percentuais são: 83% para irrigação, 5% pecuária e 4% para abastecimento público e outros

usos. Nota-se que grande parte dos recursos hídricos é utilizada na agricultura irrigada, mais especificamente na fruticultura, utilizando os sistemas de irrigação de gotejamento e microaspersão.

Figura 2.1 – Percentual de outorgas vigentes emitidas pela ANA até 2019 para o Submédio do São Francisco.



Fonte: Produção do autor.

A BHSF é marcada por acentuados contrastes socioeconômicos, apresentando áreas bem desenvolvidas e com alta densidade populacional próximas a locais de baixa renda e com baixa densidade demográfica. Estes casos são muito comuns nas regiões do Médio, Submédio e Baixo São Francisco onde as “ilhas de prosperidade” se limitam a poucos municípios (BRASIL, 2016; ZELHUBER; SIQUEIRA, 2007).

As principais fontes de poluição dos cursos d’água da bacia são os esgotos domésticos, as atividades agropecuárias e industriais, e a mineração, sendo que esta última representa cerca de 20% da atividade mineradora do Brasil. Quanto à erosão na bacia, 18 milhões de toneladas de sólidos são carreados anualmente para a calha do rio até a barragem de Sobradinho, fator que tem ocasionado grandes problemas na região. Por último deve-se atentar para as matas ciliares, cuja remoção é estimada em 96%, o que motivou a criação do programa de revitalização do rio São Francisco com o intuito de desenvolver de forma sustentável a bacia, tornando mais eficiente o uso dos seus recursos naturais (CASTRO; PEREIRA, 2017; BRASIL, 2006b; ZELHUBER; SIQUEIRA, 2007).

2.2 O Semiárido brasileiro

Abrangendo uma área de 1.128.697 km² e 1.262 municípios, o Semiárido brasileiro é uma delimitação geográfica e política que compreende o sudeste do Piauí e parte do Maranhão, os estados do Rio Grande do Norte, Alagoas, Bahia, Ceará, Sergipe, grande parte de Pernambuco e Paraíba, como também atinge o trecho que segue o rio São Francisco pelo estado de Minas Gerais (CORREIA et al., 2011; SUDENE, 2018). O Semiárido é marcado pela escassez e irregularidade de chuvas, apresentando uma precipitação anual média inferior a 800 mm, sendo que no interior da região existem áreas cuja precipitação média anual é de 500 mm enquanto no litoral Leste é de 1.000 mm. Cabe destacar a presença de microclimas em áreas de serras e montanhas no interior do Semiárido que podem atingir valores médios anuais de precipitação próximos a 1.500 mm (DE MOURA, 2019).

A região é uma das mais povoadas do Brasil com cerca de 28 milhões de habitantes (SUDENE, 2018), tendo iniciado seu processo de ocupação no período colonial com a expansão da pecuária que buscava suprir as necessidades dos senhores de engenho da região. O Semiárido brasileiro apresentou no ano de 2010 um PIB correspondente a 27,6% do nacional. Atualmente, o mesmo vem aumentando suas atividades industriais e agropecuárias (GARIGLIO; KAGEYAMA, 2010; LIMA, 2014; BRASIL, 2017).

A história do Semiárido está relacionada aos constantes casos de seca que impactaram a vida da população de diferentes formas, como aumento do desemprego rural, fome, pobreza e da migração da população que vive nas áreas afetadas. Lima (2014); Marengo et al. (2011); BRASIL (2017); Marengo et al. (2018) apresentam, até 2016, todos os episódios de seca documentados na região: 1583, 1603, 1624, 1692, 1711, 1720, 1723-1724, 1744-1746, 1754, 1760, 1772, 1766-1767, 1777-1780, 1784, 1790-1794, 1804, 1809, 1810, 1816-1817, 1824-1825, 1827, 1830-1833, 1845, 1877-1879, 1888-1889, 1891, 1898, 1900, 1902-1903, 1907, 1915, 1919, 1932-1933, 1936, 1941-1944, 1951-53, 1958, 1966, 1970, 1976, 1979-1981, 1982-1983, 1986-87, 1992-1993, 1997-1998, 2001-2002, 2005, 2010 e 2012-2016.

2.2.1 O bioma da Caatinga

Grande parte do bioma da Caatinga está inserido dentro dos limites do Semiárido brasileiro, sendo considerado o bioma brasileiro mais suscetível aos impactos das mudanças climáticas (MENEZES et al., 2012). Trata-se de um bioma que compreende um ecossistema pouco estudado, exclusivamente brasileiro, com cerca de 844.453 km² (11% do território nacional), e compreende os estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Sergipe e o norte de Minas Gerais (BRASIL, 2017). O bioma apresenta uma flora composta por árvores e arbustos tolerantes e adaptados às condições de escassez hídrica presentes. As espécies de plantas do bioma podem apresentar as seguintes modificações: presença de acúleos e espinhos, perda de folhas na estação seca (caducifólias), cobertura descontínua das copas e caules suculentos, principalmente, as espécies cactáceas (GIULIETTI et al., 2003; OLIVEIRA et al., 2006).

Devido aos constantes episódios de seca e uso indiscriminado das terras, a região é suscetível ao processo de desertificação, que segundo a *United Nations Convention to Combat Desertification – UNCCD* (2017, p. 1) é a “degradação das terras em regiões áridas, semiáridas e subúmidas secas, resultante de diferentes fatores, entre eles as variações climáticas e as atividades humanas”. Uma área maior que o estado do Ceará já foi atingida pelo processo de desertificação de forma grave ou muito grave no Semiárido brasileiro. Existem atualmente seis Núcleos de Desertificação na região: Sertão (RN/PB), Cariris Velho (PB), Inhamuns (CE), Gilbués (PI), Sertão Central (PE) e o Sertão do São Francisco (BA), sendo os estados de Pernambuco, Ceará e Paraíba os mais afetados pelo processo (PEREZ-MARIN et al., 2012; VASCONCELOS SOBRINHO, 2002).

2.3 Mudanças de uso e cobertura da terra

Segundo Bosmans et al. (2017) e Sterling et al. (2013) 41% da vegetação nativa do planeta já foi alterada pelo homem, que a substituiu, por exemplo, por pastagem ou culturas agrícolas. Lambin et al. (2001); Pielke et al. (2011); Ribeiro et al. (2016) mostraram que as mudanças de uso e cobertura da terra

devem ser estudadas, já que além destas influenciarem no clima em diferentes escalas, impactam na biodiversidade e nos ciclos biogeoquímicos, degradam os solos, causam alterações nos fluxos de carbono e água, e portanto, provocam diferentes perturbações nos diversos ecossistemas do planeta.

2.3.1 Mudança de uso no bioma da Caatinga

Segundo dados do MMA (BRASIL, 2016b,c), 378.654 km² foram desmatados do bioma da Caatinga até 2011. A retirada da vegetação deste bioma está relacionada, principalmente, à agricultura e à pecuária. Tais práticas, aliadas às políticas imediatistas e paliativas vem dificultando o desenvolvimento sustentável da região, além de colocar em risco a biodiversidade do território e o desenvolvimento das atividades nele praticadas (ARAÚJO FILHO, 2013; BRASILEIRO, 2009; MATA et al., 2015).

Particularmente, o Polo de Desenvolvimento Petrolina-Juazeiro vem apresentando grandes transformações ao longo dos anos, tanto socialmente quanto em sua infraestrutura. Seu início ocorreu na década de 1950 quando o governo federal notou o potencial agrícola da região, investindo na década seguinte em perímetros irrigados (ORTEGA; SOBEL, 2010). Além da mangicultura, nessa região se destaca o cultivo de uva de mesa, cujo principal destino tem sido o mercado externo. Ribeiro e Baiardi (2016) afirmam que entre 1997 e 2014 a produção de uvas passou de 3.700 para 28.338 toneladas; enquanto que a produção de manga foi de 21.500 para 112.809 toneladas. A exportação de uva de mesa passou de 4,7 para 66,77 milhões de dólares, enquanto a de manga passou de 18,6 milhões para 133,3 milhões de dólares. Os principais mercados de compra são a Europa, Ásia e Estados Unidos (EUA). Além da importância do Polo Petrolina-Juazeiro na produção de uva de mesa, esta região ainda contribui com 15% da produção nacional de vinhos (BRASIL, 2018).

2.4 Evapotranspiração (ET), produtividade primária bruta (GPP) e eficiência de uso da água (WUE)

2.4.1 ET

A ET é o processo de transferência do vapor d'água para atmosfera pela evaporação da água na vegetação úmida, solos, superfícies livres e transpiração das plantas. A ET é responsável pela utilização de mais da metade da energia solar absorvida pela superfície do planeta, além disso, depois da precipitação, é a segunda maior componente do ciclo hidrológico devolvendo mais de 60% da precipitação anual para atmosfera (JUNG et al., 2010; MU et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2018). A ET é influenciada pela velocidade do vento, umidade relativa, precipitação, temperatura e irradiância solar incidente na superfície (K_i) (ARAUJO et al., 2011; MOHAN; ARUMUGAM, 1996).

Dados de ET são importantes para um melhor manejo de irrigação, monitoramento de ecossistemas, estudos climáticos e hidrológicos. A ET também é importante para o acompanhamento do consumo de água na agricultura, nas cidades e no meio ambiente (OLIVEIRA, 2018).

Dentre os diversos conceitos de evapotranspiração, destacam-se a ET real diária (ET_a) e a ET de referência (ET_r). A ET_a é a evapotranspiração nas condições reais de demanda atmosférica e umidade do solo. A ET_r é a ET de uma superfície hipotética uniforme para um cultivo de alfafa ou grama mantido em condições ideais de crescimento, com específico albedo, altura e resistência aerodinâmica de superfície, sem restrições de umidade (ASCE-EWRI, 2005). Quando o cultivo de referência é uma gramínea a ET_r é identificada como ET_o . A ET_o é mais utilizada que a ET_r , sendo que geralmente os valores de ET_r são maiores que o da ET_o entre 15 a 25% (ALLEN et al., 2006; TASUMI, 2003). A ET_o (ET_r) pode ser calculada pela Equação 2.1 de Penman-Monteith (ALLEN et al., 2006) a partir de dados meteorológicos.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{ar} + 273} u_{2m} (e_{sat} - e_{real})}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_{2m})} \quad (2.1)$$

em que ET_o está em mm dia^{-1} , R_n é o saldo de radiação na superfície de cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), T_{ar} é a temperatura média do ar a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$), u_{2m} é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1}), e_{sat} é a pressão de saturação do vapor de água (kPa), e_{real} pressão real de vapor (kPa), Δ é a declividade da curva de pressão de vapor de saturação ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) e γ é o coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$). Para sua aplicação em escala horária (mm hora^{-1}), tem-se:

$$ET_{o_horária} = \frac{0,408\Delta(R_{nhr} - G_{hr}) + \gamma \frac{37}{T_{hr} + 273} u_{2m(hr)} (e_{sat(T_{hr})} - e_{real})}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_{2m(hr)})} \quad (2.2)$$

Em áreas de cultivo agrícola a ET é definida como ET_c que é determinada pela combinação entre a ET_o (ET_r) e o coeficiente de cultura (K_c) (Equação 2.3). O K_c é uma constante obtida a partir da relação entre a ET_c de um cultivo e a ET_o .

$$ET_c = ET_o \cdot K_c \quad (2.3)$$

Existem outras formas utilizadas para determinação da ET *in situ*, como lísimetros ou utilizando torres micrometeorológicas e, ou de fluxos com sistemas de *eddy covariance* ou razão de Bowen, que estimam a ET por meio do balanço de energia. Além destes métodos, também existe o sensoriamento remoto que dentre os aqui citados é a técnica mais viável quando se deseja obter a ET em grandes áreas e com menor custo (JENSEN et al., 2016).

2.4.2 GPP e WUE

A queima de combustíveis fósseis e as mudanças de uso da terra a cada ano emitem na forma de dióxido de carbono (CO_2), aproximadamente, oito bilhões de toneladas de carbono. Destes, apenas 3,2 bilhões permanecem na atmosfera, causando o aumento do efeito estufa. Os outros 4,8 bilhões são reabsorvidos pelos oceanos e pela biota terrestre (NOBRE; NOBRE, 2002). A quantidade de CO_2 na atmosfera possui uma correlação positiva com a temperatura global da superfície da planeta, portanto o aumento das concentrações de CO_2 na atmosfera podem acarretar um acréscimo da

temperatura global da superfície da Terra (HEINSCH et al., 2006; KEELING et al., 1989; MORAES et al., 2005; WOODWELL et al., 1998).

De acordo com Heinsch et al. (2006) e Yuan et al. (2010) a GPP é definida como o carbono fixado pela vegetação nos ecossistemas terrestres, sendo o início do ciclo biogeoquímico do carbono na biosfera. As plantas conseguem armazenar grandes quantidades do carbono atmosférico graças ao processo de fotossíntese, auxiliando na diminuição do CO₂ na atmosfera (JANSSON et al., 2010), que ocorre na presença ou disponibilidade de luz e água, primordialmente.

A relação entre o carbono fixado por unidade de perda de água é definida como WUE, em estudos relacionados a ecossistemas pode ser expressa como a razão entre a GPP e a ET (SUR; CHOI, 2013; YU et al., 2008) (Equação 2.4). Na aplicação em ambientes agrícolas, esta variável é definida como a produção esperada de um cultivo com relação a quantidade de água fornecida via irrigação ou evapotranspirada. A WUE relaciona duas importantes variáveis do balanço de carbono e água, permitindo uma maior compreensão dos problemas que os envolvem, sendo também uma importante variável em estudos relacionados a mudanças climáticas (ITO; INATOMI, 2012).

$$WUE = \frac{GPP}{ET} \quad (2.4)$$

2.5 Sensoriamento remoto para estimativa da ET e GPP

2.5.1 ET

Segundo Mu et al. (2011) as abordagens para estimativa da ET por sensoriamento remoto podem ser classificadas em métodos empíricos/estatísticos que relacionam índices de vegetação ou K_c; métodos residuais do balanço de energia; e outros modelos físicos que utilizam equações como a de Penman-Monteith para obtenção da ET.

No método do balanço de energia (Figura 2.2), o fluxo de calor latente (LE) é obtido como termo residual (Equação 2.5), e então convertido em ET_a, em mm dia⁻¹.

$$LE = R_n - G - H \quad (2.5)$$

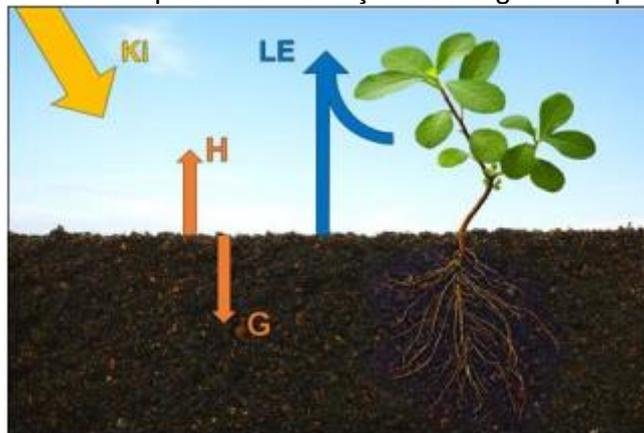
em que LE é fluxo de calor latente ($W m^{-2}$), R_n é o saldo de radiação ($W m^{-2}$), G é o fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$) e H é o fluxo de calor sensível ($W m^{-2}$).

O R_n da superfície (Equação 2.6) corresponde a diferença entre o saldo de radiação solar (irradiância solar incidente menos a irradiância solar refletida pela superfície) e o saldo de radiação infravermelha termal da superfície (radiação termal que a atmosfera emite na direção a superfície menos a radiação termal emitida pela superfície menos e a radiação no infravermelho distante refletida pela superfície) (ALLEN et al., 2010).

$$R_n = K_i(1-\alpha) + L_{w\downarrow} - L_{w\uparrow} - (1-\epsilon_s)L_{w\downarrow} \quad (2.6)$$

sendo K_i a irradiância solar incidente na superfície ($W m^{-2}$), α corresponde ao albedo da superfície (adimensional), $L_{w\downarrow}$ é a radiação infravermelha termal emitida pela atmosfera ($W m^{-2}$), $L_{w\uparrow}$ corresponde a radiação infravermelha termal emitida pela superfície ($W m^{-2}$), e ϵ_s é a emissividade de superfície (adimensional).

Figura 2.2 – Esquema do balanço de energia da superfície.



K_i = irradiância solar incidente; H= fluxo de calor sensível; G= fluxo de calor no solo; e LE= fluxo de calor latente.

Fonte: Oliveira (2018).

G é o fluxo de calor no solo, o qual é definido como a quantidade de energia transferida ao solo pelo processo de condução; H é o fluxo de calor sensível, que representa a quantidade de energia transferida para o ar na forma de calor por condução e convecção, ocasionada pela diferença de temperatura (dT) entre a superfície e a atmosfera (ALLEN et al., 2010).

A principal desvantagem dos modelos baseados no balanço de energia é que o LE é obtido como um resíduo do balanço, neste caso sua acurácia é dependente das estimativas do R_n , G, e H (ALLEN et al., 2011). Alguns exemplos dos modelos que se baseiam no balanço de energia na superfície são: SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) (BASTIAANSEN et al., 1998), METRIC (*Mapping Evapotranspiration with High Resolution and Internalized Calibration*) (ALLEN et al., 2007) e o SEBS (*Surface Energy Balance System*) (SU, 2002).

O METRIC é um modelo derivado do SEBAL (BASTIAANSEN et al., 1998) aplicado em áreas de agricultura irrigada. As principais diferenças entre o METRIC e o SEBAL (i) consistem nos critérios para seleção dos *pixels* âncora (quente e frio), que são utilizados no processo de calibração interna para obtenção do H e representam as condições extremas para transferência de calor (DE LA FUENTE-SÁIZ et al., 2017), e (ii) no uso da ET_r determinada pelo método de Penman-Monteith (ASCE-EWRI, 2005) para extrapolar a ET_a instantânea em diária. Outras melhorias do METRIC com relação ao SEBAL foram o uso da ET_r instantânea no processo de calibração ao invés do uso da fração evaporativa (FE) (ALLEN et al., 2007); a realização de um balanço hídrico com o intuito de conhecer a umidade residual no solo oriunda dos eventos de chuva anteriores, e realizar a correção do fluxo de calor latente no *pixel* quente. A principal desvantagem do modelo METRIC é a etapa de calibração interna, pois exige tempo e conhecimento da área de estudo por parte do usuário para que sejam obtidas boas estimativas da ET. A automatização desta etapa é fundamental, visto que se realizada, mapas de ET poderiam ser gerados e disponibilizados mais rapidamente.

Olmedo et al. (2016) publicaram, em linguagem R, o pacote *water* que visa estimar a ET_a utilizando o METRIC de forma automatizada, o usuário apenas deve ter conhecimento das funções do pacote para estimar cada componente do balanço de energia e inserir os dados de entrada. O pacote está em constante atualização e os autores avaliam em adicionar outros modelos como o SEBAL. Oliveira (2018), automatizou o modelo METRIC em linguagem *Python*. O autor comenta que conseguiu reduzir drasticamente o tempo de

processamento do modelo e o processo de seleção dos *pixels* âncoras sendo possível testar diferentes combinações de *pixels* candidatos de forma melhorar as estimativas da ET_a . Foolad et al. (2018) publicaram a ferramenta EEFlux (*The Earth Engine Evapotranspiration Flux*) que utiliza a coleção de imagens da plataforma Landsat no *Google Earth Engine* (GEE) para calcular a ET_a em escala local com resolução espacial de 30 m. Na plataforma é possível, num pequeno espaço de tempo, obter todos os produtos gerados pelo METRIC. É importante ressaltar que toda a etapa de calibração do modelo também foi implementada na ferramenta e que os dados meteorológicos utilizados para entrada no METRIC estão armazenados no GEE. O EEFlux foi validado para algumas regiões dos EUA, apresentando na variável ET_a (EEFlux vs. METRIC) um R^2 (coeficiente de determinação) e RMSE (raiz do erro médio quadrático) médio em áreas agrícolas de 0,76 e 1,23 mm dia⁻¹, enquanto em áreas não agrícolas apresentou R^2 de 0,44 e RMSE médio 1,39 mm dia⁻¹.

O METRIC já foi testado e validado, por exemplo, no Brasil, no Chile, nos EUA, em Portugal e na Coreia do Sul (CARRASCO-BENAVIDES et al., 2012; CHOI et al., 2011; HEALEY et al., 2011; PAÇO et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2018). Healey et al. (2011), em uma região semiárida no estado de Nebraska (EUA), compararam a ET_a estimada pelo METRIC com medidas de superfície em áreas de pradaria, em um vale e em dunas. Os autores relatam que os valores estimados apresentaram uma boa concordância com os dados de superfície e recomendaram o uso do modelo para estudo em regiões semiáridas. Oliveira et al. (2018), aplicaram o algoritmo METRIC em áreas de vegetação natural e agrícola no cerrado brasileiro, observaram que o METRIC apresenta bons resultados, porém superestimou as estimativas da ET_a em 6% numa área de Cerrado denso e 14% num Cerrado *sensu-stricto*. No entanto, na área de agricultura a superestimativa foi de 4%.

Quanto às aplicações de modelos para estimativa da ET por sensoriamento remoto baseados na equação do balanço de energia na região Semiárida do Brasil, o primeiro estudo com o SEBAL na BHSF foi feito por Bastiaanssen et al. (2001) que testaram o modelo no perímetro irrigado Senador Nilo Coelho localizado nos municípios de Casa Nova e Petrolina. Folhes et al. (2009)

avaliaram o modelo METRIC numa área agrícola situada num perímetro irrigado, e observaram que o modelo pode ser utilizado para mensurar o consumo de água e melhorar o manejo da irrigação na área estudada. Santos et al. (2017) utilizaram o modelo SEBAL para verificar o comportamento do albedo de superfície, NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*), IAF, temperatura de superfície, G e ET_a em diferentes tipos de uso e cobertura da terra num ano chuvoso (2009) e num seco (1990) na bacia do Brígida localizada no semiárido pernambucano. Neste estudo os autores conseguiram encontrar diferenças entre as variáveis estudadas e os tipos de cobertura da terra durante os anos analisados.

2.5.2 GPP

A maioria dos modelos desenvolvidos para estimativa da GPP por sensoriamento remoto é baseado no conceito da eficiência de uso da radiação (RUE) proposto por Monteith (1972) (Equação 2.7). Existe uma dificuldade para obtenção da RUE em grandes áreas, devido à dependência da variável aos fatores ambientais e da própria vegetação, assim como a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) que depende da dinâmica atmosférica (OLIVEIRA et al., 2017; TAN et al., 2012). São modelos utilizados no sensoriamento remoto para obtenção da GPP que se baseiam no conceito da RUE: C-Fix (*Parametric Production Efficiency Model*) (VEROUSTRAETE et al., 2002), VPM (*Vegetation Photosynthesis Model*) (XIAO et al., 2004), TGR (*Temperature and Greenness Rectangle Model*) (YANG et al., 2013), CFLUX (*Carbon Cycle Model*) (KING et al., 2011; TURNER et al., 2006) e o modelo proposto Bastiaanssen e Ali (2003). Além destes modelos, existem os produtos MOD17 (ZHAO et al., 2005) e o *Level 4 Carbon* (L4C) do satélite *Soil Moisture Active Passive* (SMAP) da NASA (JONES et al., 2017). Mais comumente as saídas destes modelos são a GPP, produtividade primária líquida (NPP), produtividade líquida do ecossistema (NEP) e respiração do ecossistema (R_e).

$$GPP = \varepsilon \cdot f(T_{ar,min}) \cdot f(VPD) \cdot APAR \quad (2.7)$$

onde ϵ representa a eficiência de uso da radiação, $f(T_{ar,min})$ e $f(VPD)$ correspondem a fatores de escala relacionados, respectivamente, à temperatura mínima do ar e ao déficit de pressão de vapor, e APAR.

O modelo C-Fix estima o carbono em 3 etapas: (1) mapeamento da evolução do verdor da vegetação pelo NDVI; (2) estima a FPAR (fração da radiação fotossinteticamente ativa) utilizando a metodologia de Myneni e Williams (1994); e (3) incorporam-se as informações de temperatura do ar e de radiação global incidente para estimar os fluxos de massa. Outro diferencial do modelo é que além da GPP estima-se a NPP, respiração autotrófica (R_a), respiração heterotrófica (R_h) e NEP (OLIVEIRA et al., 2017; VEROUSTRAETE et al., 2002).

O modelo VPM foi desenvolvido para estimar a GPP em áreas de florestais, sendo que utiliza o índice EVI (*Enhanced Vegetation Index*) (HUETE, 1997) para substituir o NDVI, já que este último possui algumas limitações como a sensibilidade aos aerossóis atmosféricos. Outro índice utilizado é o LSWI (*Land Surface Water Index*) (XIAO et al., 2002) que é utilizado para estimar o efeito da água na fotossíntese. O modelo também leva em consideração a vegetação fotossinteticamente ativa (PAV) e a vegetação não fotossinteticamente ativa (NPV) (XIAO et al., 2004).

Por sua vez, o TGR foi desenvolvido para estimar a GPP a partir de dados do sensor MODIS, conforme os seguintes objetivos: (1) seguir rigidamente a lógica da RUE; (2) reduzir a dependência de dados provenientes da superfície; e (3) evitar a sobreposição de informações em variáveis explicativas correlacionadas. O modelo utiliza os produtos MODIS de EVI e temperatura de superfície (LST), e dados da PAR_t (radiação fotossinteticamente ativa incidente acima do dossel) obtidos de medidas *in situ* para estimar a GPP em intervalos de 16 dias (OLIVEIRA et al., 2017; YANG et al., 2013).

O modelo CFLUX integra dados meteorológicos e de cobertura da terra, idade da cobertura vegetal e FPAR oriundos de satélite. O modelo também faz uso de um balanço hidrológico utilizando dados de precipitação, evapotranspiração

e escoamento. Ressalta-se que na modelagem a GPP, R_a e R_h são tratadas separadamente (TURNER et al., 2006).

O modelo de Bastiaanssen e Ali (2003) combina o trabalho de Field et al. (1995) que modifica o modelo CASA (*Carnegie-Ames-Stanford Approach*) (POTTER et al., 1993) para estimativa dos fluxos de carbono e o modelo SEBAL (BASTIAANSSEN et al., 1998). Do modelo SEBAL é utilizada a FE como entrada para mensurar os efeitos dos fluxos de água no processo de fixação de carbono por parte da vegetação.

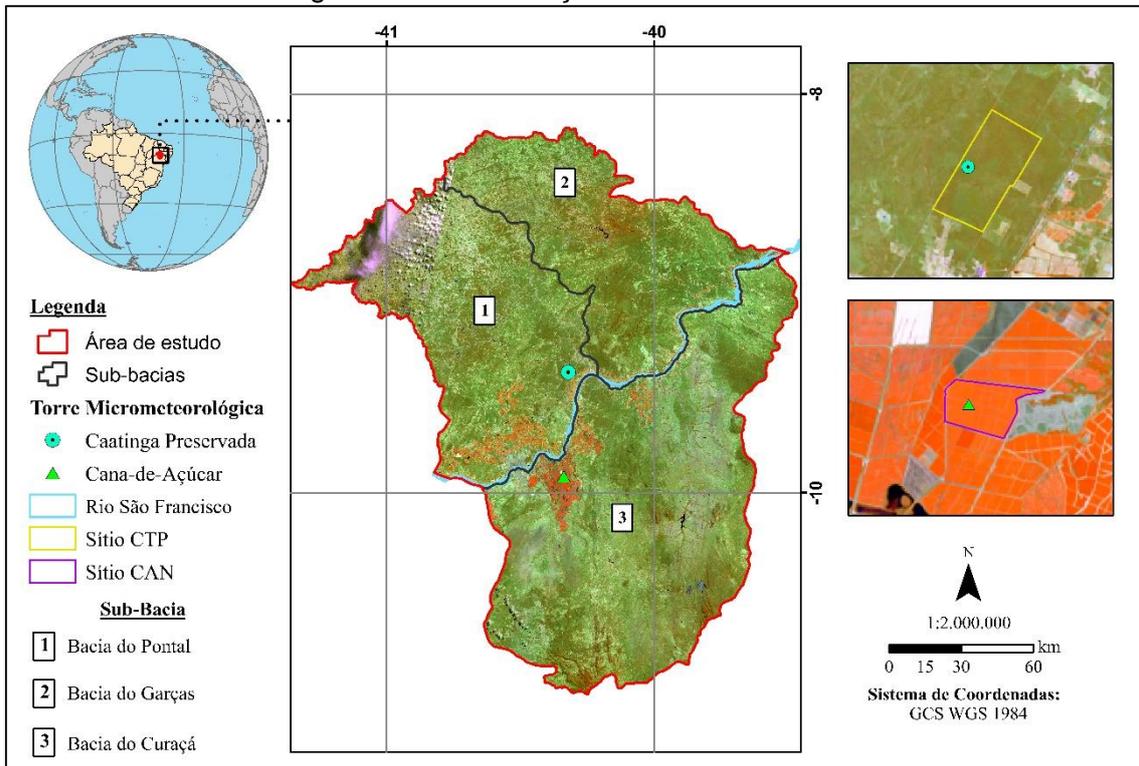
O MOD17 é um produto do acumulado da GPP, proveniente do sensor MODIS baseado no conceito da RUE. O produto tem como entrada dados meteorológicos de reanálise do GMAO (*Global Modeling and Assimilation Office*) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e de estações, além disso utiliza informações de IAF/FPAR do MOD15 e o produto de cobertura da terra do MODIS. O MOD17 faz uso da BPLUT (*Biome Properties Look-Up Table*) (RUNNING et al., 2000; WHITE et al., 2000), que é uma tabela de referência que contém parâmetros de temperatura, déficit de pressão de vapor (VPD), coeficientes de respiração e área foliar específica para o tipo de cobertura da terra classificado pelo produto MODIS.

O L4C é um produto diário com resolução espacial de 9 km, o qual utiliza como *input* dados meteorológicos do *Goddard Earth Observing System Model, Version 5* (GEOS-5), do SMAP e do sensor MODIS (JONES et al., 2017; KIMBALL et al., 2017). Além da GPP, o L4C disponibiliza dados de R_h , fluxo líquido de CO_2 do ecossistema (NEE), carbono orgânico do solo e diagnóstico ambiental.

3 ÁREA DE ESTUDO

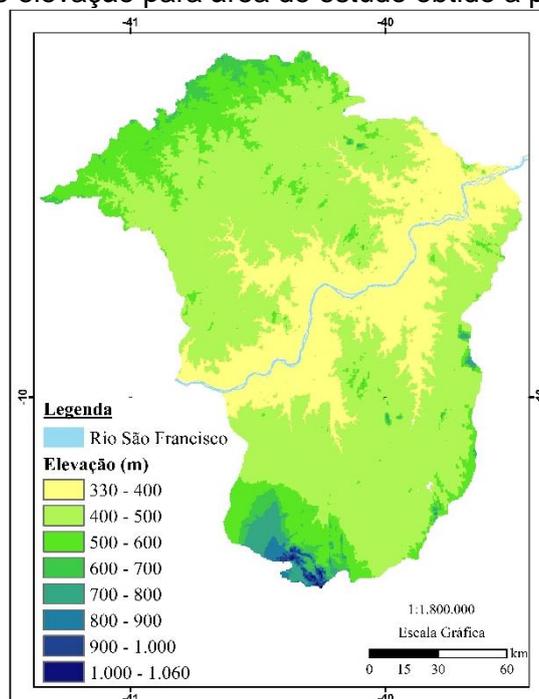
A área de estudo está localizada na região do Submédio do São Francisco entre as longitudes 41,36° W e 39,47° W, na região Semiárida brasileira, cujo bioma é o da Caatinga e compreende as sub-bacias das Garças (6.459,21 km²), Pontal (12.519,78 km²) e Curaçá (7.760,08 km²) (Figura 3.1). As sub-bacias estudadas abrangem os municípios pernambucanos de Petrolina, Lagoa Grande, Afrânio, Dormentes, Santa Cruz e Santa Maria da Boa Vista; e parte de Santa Filomena e Orocó, e na Bahia abrange os municípios de Jaguarari, e partes de Juazeiro, Curaçá, Campo Formoso e Casa Nova. A região é caracterizada pela escassez e irregularidades de chuvas, apresentando o período chuvoso entre os meses de novembro e abril, sendo que a quadra chuvosa (janeiro à abril) contribui com quase 70% do total anual (TEIXEIRA, 2010). Em média, a região apresenta acumulados de precipitação menores que 600 mm ano⁻¹, temperaturas médias anuais entre 23 °C e 27 °C, umidade relativa média no ano em torno de 50% e taxa de evaporação de 2.000 mm ano⁻¹ (BRITO et al., 2007; MARENGO, 2007). Segundo Cunha et al. (2008) os principais tipos de solos encontrados na região são: Latossolos, Argissolos, Neossolos, Planossolos, Cambissolos, Vertissolos e Luvisolos. De acordo com a Figura 3.2 a elevação na área de estudo varia entre 330 m e 1.057 m, com uma média de ~454 m. Os menores valores são encontrados nas margens do rio São Francisco e a medida que a distância para o mesmo aumenta a elevação tende a subir, atingindo os maiores valores na região que compreende parte dos municípios de Campo Formoso (BA) e Jaguarari (BA).

Figura 3.1 – Localização da área de estudo.



Fonte: Produção do autor.

Figura 3.2 – Mapa de elevação para área de estudo obtido a partir do GMTED 2010.

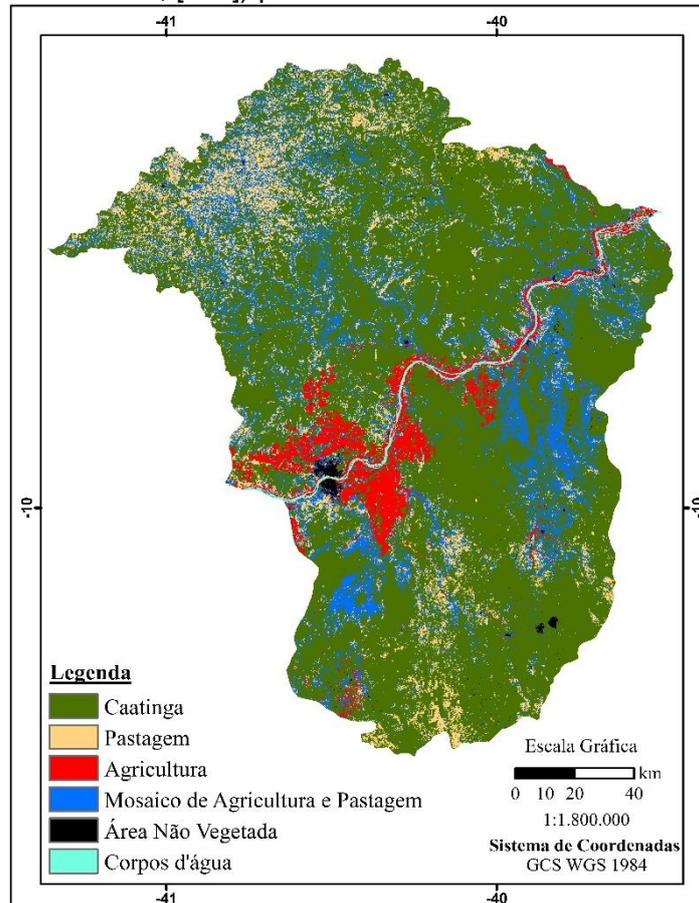


Fonte: Produção do autor.

A Figura 3.3 apresenta as principais classes de uso e cobertura da terra na região estudada, sendo que a cobertura predominante é a vegetação da

Caatinga que compreende as classes formação florestal, formação savânica e formação campestre do MapBiomas 3.0 (PROJETO MAPBIOMAS, [s.d.]).

Figura 3.3 – Mapa de cobertura da terra do MapBiomas versão 3.0 (PROJETO MAPBIOMAS, [s.d.]) para área de estudo em 2017.

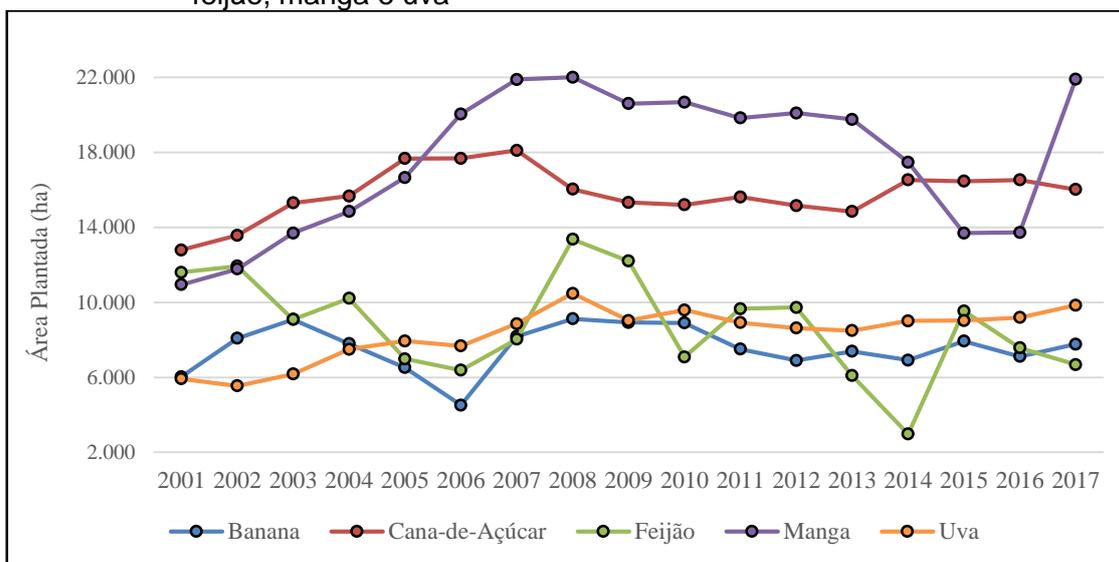


Fonte: Produção do autor.

As áreas determinadas como não vegetada conforme a Figura 3.3, são um agregado das classes do MapBiomas 3.0 (PROJETO MAPBIOMAS, [s.d.]) infraestrutura urbana, outra área não vegetada, afloramento rochoso e mineração. As áreas de agricultura (anual, perene e semi-perene) concentram-se nas margens do Rio São Francisco, devido o uso de irrigação das áreas cultivadas. São culturas de importância econômica encontradas na região: milho, feijão, manga, cana-de-açúcar, uva, banana, goiaba, acerola, coco, mamão, maracujá, melão e cebola, além de recentes áreas de maçãs e peras (IBGE, 2019). As pastagens são muito utilizadas para produção de caprinos, ovinos e bovinos. Conforme a Figura 3.4 nessa região existe expressiva área cultivada com cana-de-açúcar irrigada durante todo o ano, por gotejamento,

sulco e pivô, ocupando em torno de 15 mil ha e manga que abrange cerca de 22 mil ha. A Tabela 3.1 mostra que a menor área agrícola está presente na sub-bacia das Garças e a maior no Curaçá que também apresenta a menor área de Caatinga (~55% da área da bacia). As áreas de pastagem e agricultura, como também seus mosaicos compreendem ~34% de toda área de estudo.

Figura 3.4 – Evolução da área plantada (ha) no Polo de Desenvolvimento Petrolina-Juazeiro entre 2001 e 2017 para os cultivos de banana, cana-de-açúcar, feijão, manga e uva



Fonte: IBGE (2019).

Tabela 3.1 – Área (%) para as principais coberturas da terra (excluindo os corpos d'água) para toda área de estudo e para as sub-bacias das Garças, Pontal e Curaçá proveniente do mapa de cobertura da terra do MapBiomas versão 3.0 (PROJETO MAPBIOMAS, [s.d.]) para 2017.

Cobertura	Área de Estudo (%)	Garças Sub-bacia (%)	Pontal Sub-bacia (%)	Curaçá Sub-bacia (%)
Caatinga	66,21	70,88	70,55	55,30
Pastagem	11,51	11,46	7,53	18,02
Agricultura	4,91	2,58	5,42	6,01
Mosaico de agricultura e pastagem	16,78	14,73	15,93	19,87
Área não vegetada	0,59	0,35	0,57	0,81

Fonte: Produção do autor.

3.1 Torres micrometeorológicas

Foram utilizadas duas torres micrometeorológicas localizadas na área de estudo. A primeira torre está situada numa área de Caatinga preservada (sítio CTP) que faz parte do projeto Caatinga – FLUX Fase 2. A torre micrometeorológica do sítio CTP (Figura 3.1 e Figura 3.5) pertence a Embrapa Tropical Semiárido, localizada na cidade de Petrolina (40° 19' W, 9° 3' S, 350 m). O sítio compreende uma área de aproximadamente 600 ha de Caatinga preservada por mais de 40 anos. O sítio CTP apresenta um relevo plano, sendo composto por vegetação hiperxerófila com porte arbóreo-arbustivo (altura média de cinco metros). Quanto sua fitofisionomia a área enquadra-se na classe Savana-estépica arborizada (BRASIL, 2018). O solo da área da torre é classificado com Argissolo Amarelo eutrófico e de acordo com Souza et al. (2018) as principais espécies vegetais encontradas no sítio experimental são: *Poincianella microphylla*, *Croton conduplicatus*, *Bauhinia cheilantha*, *Manihot pseudoglaziovii* e *Commiphora leptophloeos*.

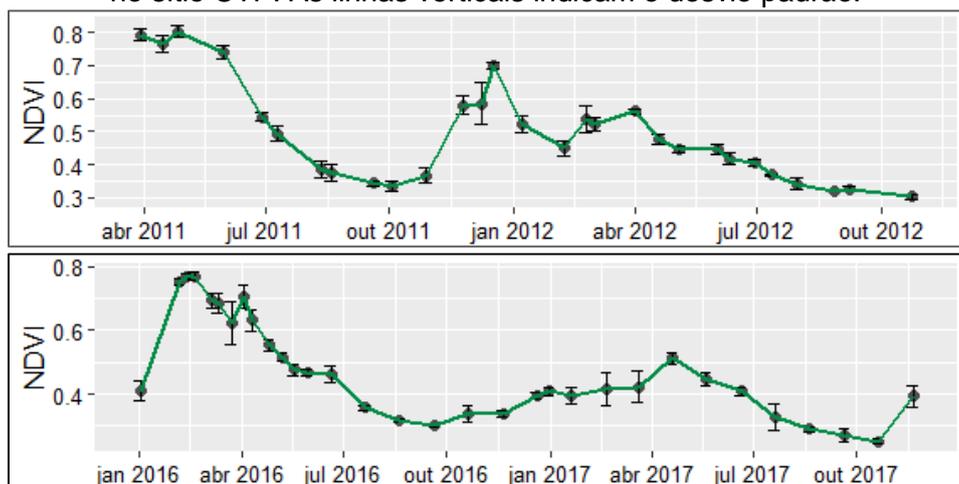
Observa-se na Figura 3.6 que em uma área de 1 km² (Figura 3.7), a partir do centro da torre, o NDVI médio oriundo do produto de reflectância (MCD43A4) do sensor MODIS foi de 0,48 ($\pm 0,02$). Os valores de NDVI ficaram entre 0,30 e 0,80 durante os anos de 2011 e 2012, com valores de desvio padrão (DP) variando entre $\pm 0,003$ e $\pm 0,06$. Já para o período de 2016 e 2017 o NDVI esteve entre 0,25 e 0,77, com DP entre $\pm 0,01$ e $\pm 0,07$. Os menores valores de NDVI aconteceram entre os meses de maio e outubro que compreendem o período seco do ano, nesta época a vegetação da Caatinga perde suas folhas. Os maiores valores foram encontrados durante o período chuvoso (novembro - abril), nota-se que no período chuvoso de 2016 os valores de NDVI foram superiores aos de 2017, isto explica-se devido ao fato de que o período chuvoso de 2017 foi mais seco que o de 2016 apresentando, segundo dados de estação meteorológica próxima, precipitação total de 177,6 mm enquanto que em 2016 foi de 456,70 mm. Deve-se mencionar que a torre está circundada por vegetação da Caatinga e a partir da análise do DP, observa-se que na área delimitada as plantas estavam em condições semelhantes.

Figura 3.5 – Fotografias da torre micrometeorológica no sítio CTP e da vegetação.



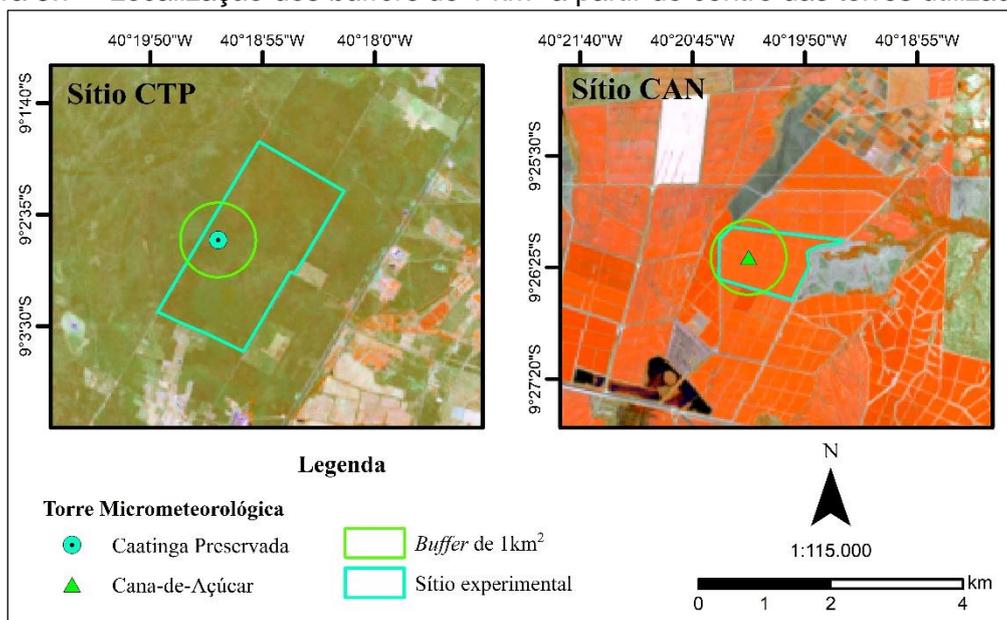
Fonte: Produção do autor.

Figura 3.6 – Perfil temporal médio do NDVI, do produto de reflectância MCD43A4, de *buffer* com 1 km² a partir do centro da torre para os períodos estudados no sítio CTP. As linhas verticais indicam o desvio padrão.



Fonte: Produção do autor.

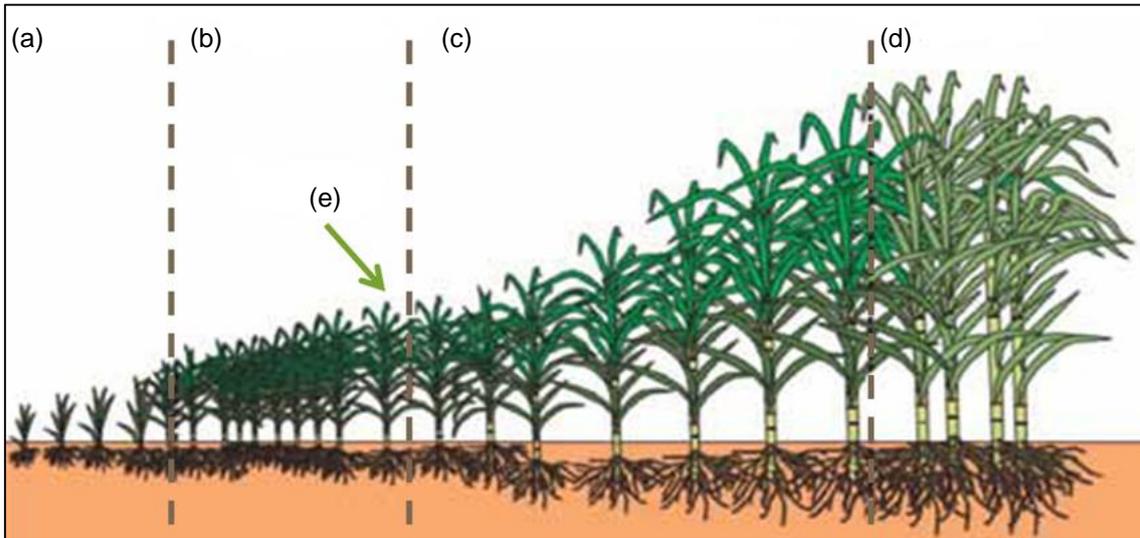
Figura 3.7 – Localização dos *buffers* de 1 km² a partir do centro das torres utilizadas.



Fonte: Produção do autor.

A segunda torre micrometeorológica (Figura 3.1) utilizada, situa-se numa área irrigada comercial de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* spp.) (sítio CAN) pertencente à Empresa Agroindústrias do Vale do São Francisco (Agrovale) (40° 20' W, 9° 26' S, 401 m) na cidade de Juazeiro. A variedade cultivada na área foi a VAT 90-212, segunda soca, irrigada por gotejamento subsuperficial num Vertissolo (CARVALHO et al., 2018). O experimento no sítio CAN foi realizado entre junho/2015 até junho/2016, compreendendo um período de 371 dias, no qual os estados fenológicos da cana-de-açúcar são mostrados na Figura 3.8. De acordo com Ramos (2018) a lâmina total de irrigação durante o período estudado foi de 1.591 mm e a produtividade da área foi próxima de 148 t ha⁻¹.

Figura 3.8 – Fenologia da cana-de-açúcar no sítio CAN durante o período do experimento.

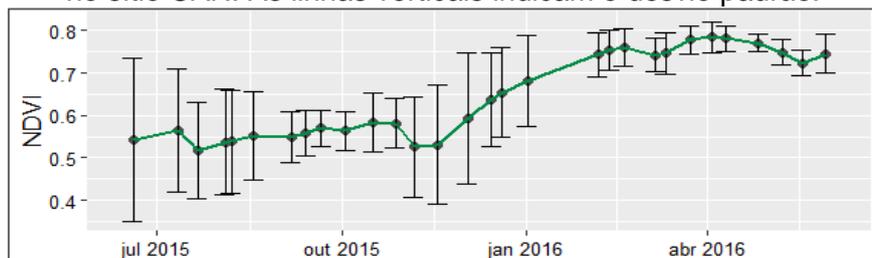


No sítio CAN as letras em destaque representam os respectivos estágios fenológicos da cana-de-açúcar no campo: (a) Fase I – brotação e estabelecimento (13/06/2015 até 13/07/2015), (b) Fase II – perfilhamento (14/07/2015 até 01/10/2015), (c) Fase III – máximo crescimento (02/10/2015 até 24/04/2016) e (d) Fase IV – maturação (25/04/2016 até 17/06/2016), e (e) fechamento do dossel. As linhas tracejadas marcam as datas finais para cada estágio.

Fonte: YARABRASIL (2016).

Conforme a Figura 3.9 o NDVI acompanha o desenvolvimento da cultura no campo, apresentando um valor médio na área ao redor da torre de 0,65 ($\pm 0,08$). Os valores de NDVI variaram entre 0,52 e 0,79, já o DP ficou entre 0,02 e 0,19. É importante mencionar que a área da torre está circundada (Figura 3.7) por áreas irrigadas de cana-de-açúcar, porém as áreas fronteiriças ao talhão utilizado no experimento estão em estádios fenológicos distintos por isso entre o período de junho/2015 até janeiro/2016 foram encontrados os maiores valores de DP.

Figura 3.9 – Perfil temporal médio do NDVI, do produto de reflectância MCD43A4, em *buffer* de 1 km² a partir do centro da torre para os períodos estudados no sítio CAN. As linhas verticais indicam o desvio padrão.

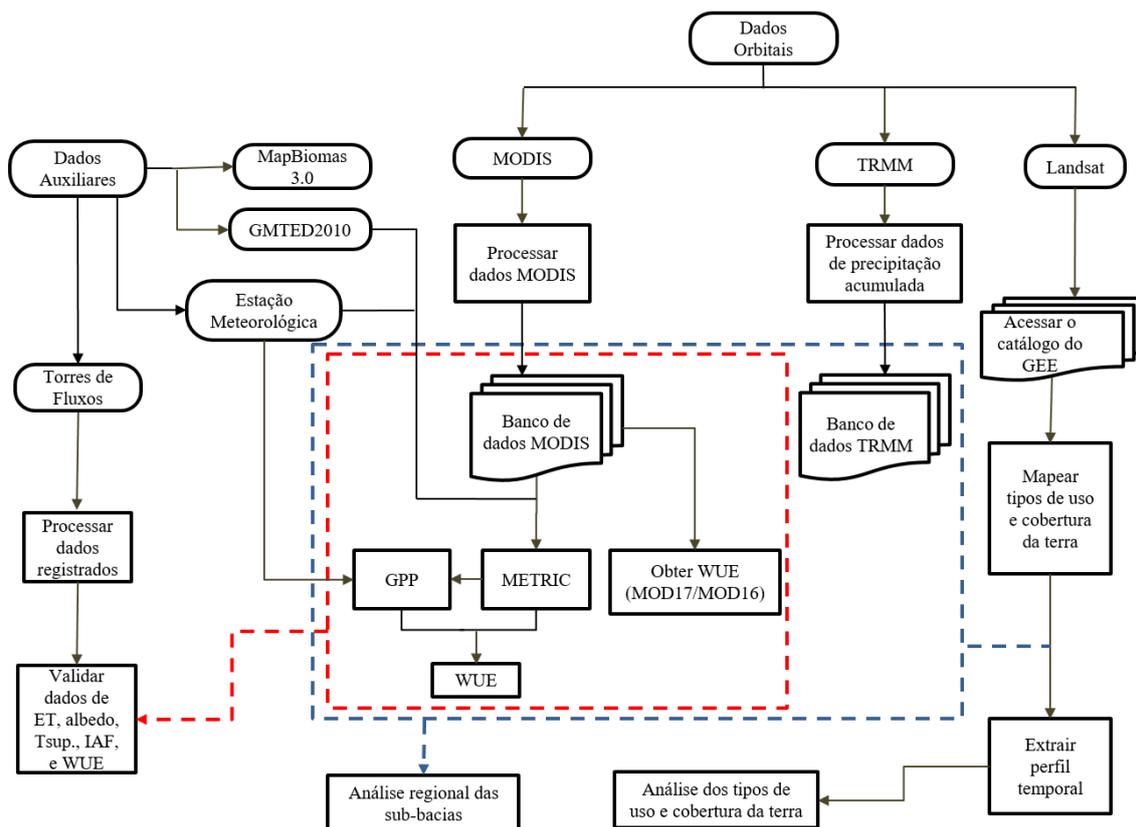


Fonte: Produção do autor.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os materiais utilizados e a metodologia realizada para obtenção dos objetivos propostos. A Figura 4.1 mostra de forma simplificada cada etapa dos passos desenvolvidos e os dados trabalhados.

Figura 4.1 – Fluxograma das principais etapas da metodologia.



Fonte: Produção do autor.

4.1 Dados micrometeorológicos

Para o sítio CTP os dados da torre abrangiam o período de janeiro/2011 até dezembro/2012, e janeiro/2016 a dezembro/2017. No sítio CAN as observações compreendiam o intervalo de maio/2015 até maio/2016. Os instrumentos utilizados para obtenção dos dados de superfície são mostrados na Tabela 4.1. Os dados de superfície foram utilizados para validar as variáveis α , LST, IAF, ET, e WUE.

Foram utilizados os dados de albedo e temperatura de superfície para às 10:30 em cada torre, e pra a ET e a GPP foram utilizados os acumuladas das 07:30

até às 16:30. Deve-se salientar que não houve preenchimento de falhas para os dados de albedo e temperatura. Contudo para as variáveis ET e GPP aplicou-se o método de interpolação linear conforme realizado por Oliveira et al. (2018), descartando-se as datas em que ocorreram mais de sete falhas. Após a filtragem dos dados de torre foi calculada a WUE.

Tabela 4.1 – Especificações dos sensores e variáveis utilizadas nos sítios CTP e CAN.

Variável	CTP		CAN	
	Instrumento	Altura (m)	Instrumento	Altura (m)
Radiação solar de ondas curtas incidente (K_i) e refletida (K_r), $W\ m^{-2}$	Piranômetro (CM3, Kipp & Zonen)	13,3	Piranômetro (CM3, Kipp & Zonen)	8
Saldo de radiação (R_n), $W\ m^{-2}$	Saldo radiômetro (CNR1, Kipp & Zonen)	13,3	Saldo radiômetro (CNR1, Kipp & Zonen)	8
Radiação fotossinteticamente ativa (PAR), $W\ m^{-2}$	Sensor <i>quantum</i> (LI-190SA, LI-COR)	13,3	Sensor <i>quantum</i> (LI-190SA, LI-COR)	8
Temperatura de superfície (T_s), °C	Radiômetro infravermelho (SI-111, Campbell Scientific)	16,0	-	-
Fluxo de calor latente e carbono	Sistema de covariância dos vórtices turbulentos (CSAT3, Campbell Scientific Inc. + LI-7500, LI-COR Inc.)	16,9	-	-

Fonte: Produção do autor.

4.2 Dados de IAF

O IAF para os sítios CAN e CTP foi estimado, para às 12 horas, em função da interceptação luminosa pelo dossel, para isso utilizou-se a metodologia proposta no manual do ceptômetro AccuPAR (DECAGON DEVICES, 2011). Os dados de radiação fotossinteticamente ativa incidente abaixo do dossel (PAR_b) e acima do dossel (PAR_t) necessários, foram provenientes do sensor *quantum* (LI-190SA, LI-COR) instalado em ambos os sítios. Nos dados da PAR não houve preenchimento de falhas e todas as datas que apresentaram valores PAR_b ou PAR_t igual a 0 foram removidas da análise.

4.3 Dados orbitais

4.3.1 Dados TRMM

O satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) é resultante da parceria entre a NASA e da *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA). O satélite fornece informações de precipitação a cada três horas desde 1997 da região

dos trópicos, sendo muito útil para estudos e monitoramento das chuvas (KUMMEROW et al., 2000; PEREIRA et al., 2013). O produto 3B43 foi validado por Pereira et al. (2013) para todo o Brasil, verificando que para a região Nordeste as estimativas da precipitação pelo TRMM superestimam em 9% os valores observados pelas redes de estações meteorológicas do INMET/CPTEC para a região.

Foi utilizado a versão 7 do produto de precipitação acumulada mensal 3B43 do TRMM com resolução espacial de $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$, para os anos de 2011, 2012, 2015 e 2016. As imagens do TRMM foram obtidas da página da NASA Giovanni (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>). Após obtenção das imagens, foi feita a conversão destas do formato NetCDF para Geotiff por meio do *software* ArcMap. Em seguida utilizando a linguagem R foi feita a reamostragem dos *pixels* para 500 metros por meio da metodologia do vizinho mais próximo, recorte da área de estudo, remoção dos corpos d'água por meio da máscara de águas continentais do produto MOD44W do sensor MODIS e geração das médias mensais de precipitação para o período de 2011, 2012, 2015 e 2016.

4.3.2 Dados GMTED2010

O *Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010* (GMTED2010) (DANIELSON; GESCH, 2011) é um modelo digital de elevação (MDE) global desenvolvido para substituir o GTOPO30. Foi criado em parceria pela USGS (*United States Geological Survey*) e a NGA (*National Geospatial-Intelligence Agency*). O GMTED2010 fornece o MDE global nas resoluções espaciais de aproximadamente 1 km, 500 m e 250 m.

O GMTED2010 foi adquirido da USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) na resolução espacial de aproximadamente 500 m para área de estudo. Após obtenção, foi feita a reamostragem do raster para compatibilização com os dados do sensor MODIS.

4.3.3 Dados MODIS

Foi utilizada a coleção 6 dos produtos do sensor MODIS: MOD11A1, MCD43A4, MOD13A1, MOD15A2H, MOD17A2H, MOD16A2 e MCD43A3 obtidos do Appears (<https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appears/>); e a versão 5 para o ano de 2009 do MOD44W adquirida do Earthdata (<https://earthdata.nasa.gov/>) (Tabela 4.2). Com exceção do MOD11A1 e MOD44W que, respectivamente, possuem resolução espacial de 1 km e 250 m, todos os outros possuem resolução espacial de 500 m.

Tabela 4.2 – Dados do sensor MODIS utilizados.

Nome	Coleção	Produto	Resolução Espacial	Resolução Temporal
MCD43A3	6.0	Albedo (<i>Black e White-sky</i>)	500 m	Diário
MCD43A4	6.0	Reflectância de superfície	500 m	Diário
MOD11A1	6.0	Temperatura de superfície (LST)	1 km	Diário
MOD13A1	6.0	NDVI	500 m	Composições de 16 dias
MOD15A2H	6.0	IAF	500 m	Composições de 8 dias
MOD16A2	6.0	Evapotranspiração	500 m	Composições de 8 dias
MOD17A2H	6.0	GPP	500 m	Composições de 8 dias
MOD44W	5.0	Máscara de águas continentais	250 m	31/12/2008

Fonte: Produção do autor.

O MOD11A1 (WAN; HULLEY, 2015) é um produto diário que contém a temperatura da superfície sob áreas terrestres livres de nuvens. As nuvens do MOD11A1 foram filtradas a partir do produto MOD35L2 do sensor MODIS/Terra e contém 12 bandas. Para este estudo foi utilizada as imagens diurnas de LST. O produto MCD43A4 (SCHAAF; WANG, 2015) fornece a reflectância BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*) ajustada ao nadir, sendo um produto diário que baseia-se numa janela de 16 dias, em que o dia de interesse é o nono dia dessa janela. O MOD13A1 (DIDAN, 2015)

fornece índices de vegetação tendo uma resolução temporal de 16 dias. O MOD13A1 é um produto do sensor MODIS/Terra gerado utilizando 2 pré-composições de 8 dias do produto de reflectância do MODIS, onde o valor do *pixel* será baseado no melhor disponível. Para este estudo foi utilizada a banda de NDVI do produto MOD13A1. O MOD15A2H (MYNENI et al., 2015) é um produto combinado com resolução temporal de 8 dias proveniente de dados da plataforma Terra/MODIS de IAF e da fração da radiação fotossinteticamente absorvida (FPAR). Os dados de entrada no algoritmo do MOD15A2H são os produtos de reflectância diária de superfície do MODIS para as bandas do vermelho (648 nm) e infravermelho próximo (858 nm), e um mapa de biomas que classifica a vegetação global (YAN et al., 2016).

O MOD17A2H (RUNNING et al., 2015; ZHAO et al., 2005) corresponde ao acumulado da GPP em 8 dias originado a partir de dados do sensor MODIS/Terra. O acumulado de evapotranspiração para 8 dias, MOD16A2 (MU et al., 2011; RUNNING et al., 2017), é baseado na equação de Penman-Monteith (Equação 2.1) adaptada para uso com dados de sensoriamento remoto, tendo como entrada dados meteorológicos de reanálise do GMAO/NASA e MODIS. Os produtos MODIS com resolução espacial de 500 m utilizados são: cobertura da terra (MCD12Q1), também as composições de 8 dias de IAF/FPAR do MOD15A2H e albedo (MCD43A2/A3). Além disso o MOD16A2 faz uso da BPLUT (RUNNING et al., 2000; WHITE et al., 2000) com constantes para parâmetros biofísicos da vegetação cada tipo de cobertura da terra.

O produto de albedo MCD43A3 (WANG et al., 2018) do MODIS como o MCD43A4 é um produto combinado diário baseado numa janela de 16 dias, no qual o dia de interesse corresponde ao nono dia. O MCD43A3 fornece o *white-sky* – WSA (albedo bihemisférico) e o *black-sky* – BSA (albedo direcional hemisférico) ao nadir. No produto o WSA é definido como o albedo proveniente quando a componente difusa é isotrópica e não há a componente direta. Já o BSA é o albedo decorrente da ausência da componente difusa, ou seja, quando apenas ocorre a componente direta de forma isotrópica. De posse das bandas de condições extremas, BSA e WSA, foi feita a correção do albedo

para as condições atmosféricas reais (*blue-sky* albedo – BLSA). Para obtenção do BLSA é necessário combinar o BSA e WSA em relação a fração de luz difusa (FLD), esta última é em função do profundidade óptica atmosférica (AOD) e do ângulo solar zenital. O BLSA (α) foi obtido utilizando (SCHAAF et al., 2002; WANG et al., 2018):

$$\alpha(\theta,\lambda)=\{1-S(\theta,\tau(\lambda_{AOD}))\}\alpha_{bs}(\theta,\lambda_{AOD})+S(\theta,\tau(\lambda_{AOD}))\alpha_{ws}(\theta,\lambda_{AOD}) \quad (4.1)$$

sendo $S(\theta,\tau(\lambda_{AOD}))$ a FLD, α_{bs} é o BSA e α_{ws} é o WSA. θ é o ângulo solar zenital e λ_{AOD} é a profundidade óptica atmosférica.

Para obtenção da λ_{AOD} , foram extraídos todos os valores referentes ao centróide da área de estudo para o produto diário MOD08 AOD 550nm para os anos de 2011, 2012, 2015, 2016 e 2017 utilizando a plataforma da NASA Giovanni. O θ foi calculado para cada dia do ano, considerando a latitude do centróide da área de estudo e para o horário das 10:30 hora local.

Todas as imagens MODIS foram processadas utilizando a linguagem R. Para compatibilidade dos produtos foi feita a reamostragem das imagens de LST e máscara de águas continentais para 500 m utilizando, respectivamente, os métodos do vizinho mais próximo e o método bilinear. Após, foi feita a aplicação dos fatores de escala e remoção dos *pixels* inválidos para cada produto MODIS.

A FLD foi adquirida por meio de uma *look-up table* (UMB, 2018), que correlaciona λ_{AOD} e o θ para cada banda do MODIS e o tipo de aerosol. Para este estudo foi utilizada a banda 10 do produto MCD43A3 que corresponde ao albedo para a faixa de ondas curtas (0,3 – 5 μm) e o tipo de aerosol considerado foi o continental. Para obtenção da FLD a *look-up table* foi implementada utilizando a linguagem R, que correlacionava o valor do θ calculado e a λ_{AOD} proveniente do produto MOD08 AOD 550nm. Com a geração da FLD para o período estudado foi obtido o α .

Depois de processar todas as imagens MODIS para o período que compreende os anos de 2011, 2012, 2015, 2016 e 2017, foram calculadas as médias mensais.

4.4 Implementação do METRIC

O modelo do METRIC foi implementado em linguagem R e alimentado com dados orbitais e de superfície. Os dados de superfície (temperatura média do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento - u , altura do anemômetro utilizado para medir a u , precipitação, altura média da vegetação ao redor da estação e ET_o) foram obtidos de uma estação meteorológica ($40^\circ 33' W$, $9^\circ 19' S$, 393 m) situada no município de Petrolina de responsabilidade do Laboratório de Meteorologia – LABMET da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF). Os dados orbitais utilizados que compreendem os anos de 2011, 2012, 2015 e 2016 foram: o produto MCD43A4, MOD11A1, o dados gerados de α , e o MDE proveniente do GMTED2010.

Inicialmente foi gerado R_n da superfície pela Equação 2.6, sendo o K_i calculado pela Equação 4.2:

$$K_i = \frac{G_{sc} \cdot \cos \theta \cdot \tau}{d_r} \quad (4.2)$$

em que G_{sc} é a constante solar (1367 W m^{-2}), $\cos \theta$ em radianos, τ é a transmitância atmosférica no momento de passagem do satélite, d_r é a distância relativa Terra-Sol (Unidades astronômicas – UA).

d_r é obtido por meio da Equação 4.3. utilizada por Allen et al. (2006), em que DJ representa o dia juliano do ano.

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi DJ}{365}\right) \quad (4.3)$$

A transmitância atmosférica na faixa do espectro solar é determinada pela Equação 4.4, em que z (metros) é a elevação obtida do MDE:

$$\tau = 0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z \quad (4.4)$$

$L_{w\downarrow}$ é calculada por meio da Lei de Stefan-Boltzmann:

$$L_{w\downarrow} = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_{ar}^4 \quad (4.5)$$

em que ε_a é a emissividade atmosférica (Equação 4.6) desenvolvida por Bastiaanssen (1995) e aplicada utilizando os coeficientes obtidos por Allen

(2000) para uma área de alfafa em Idaho, σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8}$), e T_{ar} é a temperatura média do ar próxima à superfície (K).

$$\varepsilon_a = 0,85 \cdot (-\ln \tau)^{0,09} \quad (4.6)$$

A $L_{w\uparrow}$ é obtida pela Lei de Stefan-Boltzman, em que ε_s é a emissividade da superfície (Equação 4.7) e T_s é a temperatura de superfície (K) oriunda do produto MOD11A1.

$$L_{w\uparrow} = \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (4.7)$$

A ε_s foi calculada por meio de uma equação desenvolvida por Tasumi (2003), para o cálculo é necessário obter o NDVI e o IAF.

$$\varepsilon_s = 0,95 + 0,01 \cdot IAF \quad (4.8)$$

A Equação 4.8, desenvolvida por Tasumi (2003), apenas é válida para valores de NDVI > 0 e IAF ≤ 3, quando o NDVI > 0 e IAF > 3 considerou-se $\varepsilon_s = 0,98$. Para os valores de NDVI ≤ 0 e $\alpha < 0,47$ foi considerado $\varepsilon_s = 0,985$. O IAF é calculado pela Equação 4.9 conforme mostrado por Allen et al. (2010):

$$IAF = 11 \cdot SAVI^3 \quad (4.9)$$

em que a Equação 4.9 só é válida para valores de SAVI ≤ 0,817. Quando o SAVI > 0,817 considera-se IAF = 6. O SAVI é um índice desenvolvido para amenizar os efeitos do solo no NDVI, obtido pela:

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_{t,2} - \rho_{t,1})}{(L + \rho_{t,2} + \rho_{t,1})} \quad (4.10)$$

onde $\rho_{t,1}$ e $\rho_{t,2}$ correspondem, respectivamente, as reflectâncias nas bandas 1 (infravermelho próximo) e 2 (vermelho) do sensor MODIS/Terra. L é uma constante de ajuste que varia de acordo com a quantidade de vegetação sobre o solo, para este estudo utilizou-se o valor proposto por Tasumi (2003) de 0,1.

Após a geração do R_n , foi calculado o G pela equação empírica desenvolvida por Bastiaanssen (2000):

$$G = R_n \left[\frac{T_s}{\alpha} (0,0038\alpha + 0,0074\alpha^2) (1 - 0,98NDVI^4) \right] \quad (4.11)$$

R_n é o balanço de radiação ($W m^{-2}$), T_s é a temperatura de superfície obtida do MOD11A1 ($^{\circ}C$), α é o albedo proveniente da metodologia do BLSA. Em seguida teve início o processo de obtenção do H conforme a Equação 4.12 descrita por Allen et al:

$$H = \frac{(\rho \cdot C_p \cdot dT)}{r_{ah}} \quad (4.12)$$

em que ρ é a densidade do ar ($kg m^{-3}$) dada pela Equação 4.13, C_p é a constante do calor específico do ar ($1.004 J kg^{-1} K^{-1}$), dT (K) é a diferença de temperatura entre duas alturas z_1 e z_2 (próximo a superfície), e r_{ah} é a resistência aerodinâmica para transporte de calor ($s m^{-1}$).

$$\rho = \frac{1000 \cdot P}{1,01(T_s - dT)R} \quad (4.13)$$

onde P (kPa) é a pressão atmosférica média calculada pela Equação 4.14, T_s (K) é a temperatura da superfície obtida do MOD11A1 e R é a constante universal dos gases perfeitos ($287 J kg K^{-1}$).

$$P = 101,3 \left(\frac{T_{ar} - 0,0065z_i}{T_{ar}} \right)^{5,26} \quad (4.14)$$

em que z_i (m) é a elevação de cada *pixel* obtida a partir do MDE e T_{ar} corresponde a temperatura do ar (K) a $20^{\circ}C$.

O r_{ah} e o dT são obtidos por meio do processo de calibração interna do modelo chamado CIMEC (*Calibration Using Inverse Modeling at Extreme Conditions*), no qual são identificadas duas condições extremas (ou quase) na imagem definidas como *pixels* âncoras (quente e frio) e será realizado um processo iterativo para que no fim obtenha-se o H , a seleção dos *pixels* será explicada no Item 4.4.1.

Antes de realizar o processo iterativo foi calculada a velocidade de fricção do vento (u^* , $m s^{-1}$) para área da estação meteorológica considerando a atmosfera em condição de estabilidade neutra.

$$u^* = \frac{k \cdot u}{\ln\left(\frac{z}{z_{om}}\right)} \quad (4.15)$$

em que k é a constante de von Karman (0,41), u é a velocidade do vento (m s^{-1}) registrada pela estação meteorológica às 10:30 horas numa determinada altura ($z= 2 \text{ m}$) e Z_{om} (m) é o coeficiente de rugosidade da superfície na área da estação meteorológica obtido pela Equação 4.15. O Z_{om} é dependente da forma da superfície, quanto mais rugosa e irregular for a superfície maior será o coeficiente e quanto menos rugosa e regular se encontrar os valores de Z_{om} serão menores. O Z_{om} foi calculado para área da estação meteorológica utilizando a equação proposta por Brutsaert (1982):

$$Z_{om} = 0,12h \quad (4.16)$$

onde h é a altura média da vegetação que circunda a estação. Para este estudo utilizou-se $h= 0,12 \text{ m}$.

Após esta etapa foi calculada a u à 200 m, sendo este passo feito porque não existem informações da u para cada *pixel* da imagem, por isso, os valores calculados de u^* e u são apenas válidos para área da estação meteorológica. Conforme Trezza (2002) e Tasumi (2003) com o objetivo de extrapolar os valores da u para toda a imagem, calcula-se u_{200m} , essa altura é definida porque se espera que já não haja mais interferência da rugosidade de superfície na u , podendo-se então assumir a variável como constante para toda a imagem.

$$u_{200m} = u^* \frac{\ln\left(\frac{200}{Z_{om}}\right)}{k} \quad (4.17)$$

em que são utilizados os valores u^* e Z_{om} para a área da estação meteorológica. Após o cálculo da u_{200m} , obteu-se a u^*_{200m} .

$$u^*_{200m} = \frac{k \cdot u_{200m}}{\ln\left(\frac{200}{Z_{om}}\right)} \quad (4.18)$$

Nesta etapa o Z_{om} foi calculado para cada *pixel* pela Equação 4.19:

$$Z_{om} = 0,0018IAF \quad (4.19)$$

Após o cálculo da u^*_{200m} , determinou-se o r_{ah} assumindo a atmosfera em condições neutras, utilizando a Equação 4.20:

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{u^*} \quad (4.20)$$

Com a obtenção do r_{ah} foi feita a escolha dos *pixel* âncoras e o processo iterativo para obtenção da H. Esta etapa será detalhada no Item 4.4.1.

Depois de gerar o H, foi calculado o LE como termo residual da Equação 4.21 para o horário de passagem do satélite. Em seguida foi feita a conversão da LE para mm h^{-1} :

$$ET_{inst} = 3600 \frac{LE}{\lambda} \quad (4.21)$$

em que 3600 é uma constante para converter de segundos para horas e λ representa o calor latente de vaporização da água (J kg^{-1}) obtido pela Equação 4.22, definida por Harrison (1965).

$$\lambda = [2,501 - 0,00236(T_s - 273)] \cdot 10^6 \quad (4.22)$$

onde T_s (K) foi obtida do produto MOD11A1.

Após calcular a ET_{inst} , foi obtida a fração da ET de referência (ET_oF) que equivale ao K_c , o qual é constante ao longo do dia para as culturas agrícolas sem estresse hídrico (OLIVEIRA, 2018). Para este estudo a ET de referência foi tratada como ET_o . A ET_oF é representada pela razão entre ET_{inst} e a $ET_{o_horária}$ (mm h^{-1}), calculada pela Equação 4.23:

$$ET_oF = \frac{ET_{inst}}{ET_{o_horária}} \quad (4.23)$$

em que a ET_{inst} (mm h^{-1}) é o produto gerado da Equação 4.21 e a $ET_{o_horário}$ é obtida a partir da estação meteorológica para a hora de passagem do satélite.

Por último foi obtida a ET_a (mm dia^{-1}), obtida pela Equação 4.24 e que é representada pelo produto da ET_oF , sendo considerada constante ao longo do dia, e a $ET_{o_diária}$ determinada pelo acumulado da $ET_{o_horária}$ ao longo o dia:

$$ET_a = ET_oF \cdot ET_{o_diária} \quad (4.24)$$

4.4.1 Seleção dos *pixels* âncora

No METRIC os *pixels* âncoras devem ser escolhidos em áreas agrícolas representativas da região. O *pixel* frio deve ser selecionado numa área bem irrigada e coberta pela vegetação, assumindo-se que o $H=0$ e a $ET=1,05ET_r$. O valor 1,05 corresponde ao K_c e se baseia na experiência de Tasumi (2003), que no trabalho comenta que em áreas agrícolas bem irrigadas e em pleno desenvolvimento no sul de Idaho a ET é, aproximadamente, 5% maior que a ET_r . Para este estudo utilizou-se $ET=1,26ET_o$ conforme descrito por Tasumi (2003) para gramíneas. Para o *pixel* quente se deve selecionar uma área agrícola sem cobertura vegetal e totalmente seca ($LE=0$ ou próximo de zero) de forma que a energia esteja sendo utilizada somente para a produção do H . Para avaliar as condições de umidade no solo, foi realizado um balanço hídrico diário, conforme proposto por Allen et al. (2006), para área da estação meteorológica utilizada. Quando existia algum componente de evaporação devido a precipitação ou outro evento, era realizado uma correção da $ET_{o_horária}$ para o *pixel* quente por meio do coeficiente de evaporação (K_e) para o solo exposto.

A escolha dos *pixels* âncora seguiu a metodologia proposta por Allen et al. (2010), com alguns ajustes para área de estudo. O processo de escolha dos *pixels* foi automatizado por meio da linguagem R, porém ainda houve a necessidade de avaliar a saída da filtragem pelo R dos possíveis *pixels* candidatos. O produto da filtragem consiste de dois arquivos *shapefiles* referentes, respectivamente, ao *pixel* quente e frio. Em cada *shapefile* estão localizados todos os *pixels* que se enquadravam nos limiares utilizados para a seleção dos *pixels* quente e frio. A avaliação dos possíveis *pixels* foi realizada utilizando imagens dos sensores OLI/Landsat-8, ETM+/Landsat-7 e TM/Landsat-5 por meio do GEE em datas próximas as utilizadas na modelagem, com isso foram escolhidos os melhores *pixels* quente e frio nos seus respectivos *shapefiles*.

Considerando um raio de 80 km a partir da estação meteorológica utilizada na modelagem, o *pixel* frio foi selecionado para uma área agrícola com as

seguintes características: $0,15 \leq \alpha \leq 0,24$; $0,6 \leq \text{NDVI} \leq 0,84$; e $\text{IAF} \geq 2,2$. Os candidatos ao *pixel* quente apresentavam os seguintes limiares: $0,15 \leq \alpha \leq 0,23$ e $\text{NDVI} \leq 0,22$. Deve-se destacar que o *pixel* quente deveria ser escolhido em áreas agrícolas não vegetadas, porém foi observado que áreas de solo exposto não agrícolas ou com pouca vegetação natural apresentaram bons resultados, por isso foram também consideradas na seleção.

Após a seleção dos *pixels* âncoras foi calculado o H_{quente} :

$$H_{\text{quente}} = (R_n - G)_{\text{quente}} - \left(\frac{\text{ET}_{\text{o,horária}} \cdot K_e \cdot \lambda}{3600} \right) \quad (4.25)$$

em que $R_{n_{\text{quente}}}$ é o balanço de radiação (W m^{-2}) e G_{quente} é o fluxo de calor no solo (W m^{-2}), ambos obtidos no *pixel* quente da imagem. $\text{ET}_{\text{o,inst}}$ é a evapotranspiração de referência (mm h^{-1}) para estação meteorológica na hora de passagem do satélite e o K_e foi obtido por meio do balanço hídrico.

O H do *pixel* frio foi obtido por:

$$H_{\text{frio}} = (R_n - G)_{\text{frio}} - \left(\frac{\text{ET}_{\text{o,horária}} \cdot 1,26 \cdot \lambda}{3600} \right) \quad (4.26)$$

sendo $R_{n_{\text{frio}}}$ é o balanço de radiação (W m^{-2}) e G_{frio} é o fluxo de calor no solo (W m^{-2}), ambos obtidos no *pixel* frio da imagem. Em seguida foi calculado o gradiente de temperatura para o *pixel* frio:

$$dT_{\text{frio}} = \frac{H_{\text{frio}} \cdot r_{\text{ah_frio}}}{\rho \cdot C_p} \quad (4.27)$$

E para o *pixel* quente:

$$dT_{\text{quente}} = \frac{H_{\text{quente}} \cdot r_{\text{ah_quente}}}{\rho \cdot C_p} \quad (4.28)$$

Após o cálculo do H e dT para cada situação extrema, assumindo que existe uma relação linear entre dT e T_s , expressa pela Equação 4.29, foram calculados os coeficientes A e B , pela Equação 4.30 e Equação 4.31.

$$dT = B + A \cdot T_s \quad (4.29)$$

$$A = \frac{dT_{\text{quente}} - dT_{\text{frio}}}{T_{s_{\text{quente}}} - T_{s_{\text{frio}}}} \quad (4.30)$$

$$B = dT_{\text{quente}} - A \cdot T_{s_{\text{quente}}} \quad (4.31)$$

Em seguida foi calculado o dT para a primeira iteração utilizando os coeficientes A e B , e a T_{s_MDE} (K). A T_{s_MDE} corresponde a T_s corrigida para a elevação do terreno, de forma que o METRIC não atribua as áreas de maior elevação (e menor temperatura) maiores valores de ET (ALLEN et al., 2010; OLIVEIRA, 2018). Por isso a T_{s_MDE} foi calculada a partir da metodologia proposta por Tasumi (2003), sendo a T_s a LST do produto MOD11A1, o MDE foi oriundo do GMTED2010, determinando-se assim a média do MDE na área de estudo como datum de referência.

Com a obtenção do dT , aplicou-se o procedimento iterativo baseado na teoria de Monin-Obukhov, que buscou estabilizar as condições atmosféricas para todos os *pixels* da imagem. Nesta etapa foi recalculado o H_{quente} , H_{frio} , dT_{quente} , dT_{frio} e as constantes de calibração A e B , até que os coeficientes fossem estabilizados. Esta etapa é detalhada em Allen et al. (2007).

4.5 Obtenção da GPP

A GPP (Equação 4.32) foi obtida por meio da metodologia proposta por Bastiaanssen e Ali (2003).

$$GPP_{B.A.} = APAR \cdot \varepsilon \quad (4.32)$$

em que a $GPP_{B.A.}$ é obtida em $g \text{ C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, $APAR$ ($W \text{ m}^{-2}$) e a radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação é calculada através da Equação 4.33. Já o termo ε ($g \text{ C MJ}^{-1}$) corresponde a eficiência de uso da luz, modificada por Bastiaanssen e Ali (2003).

$$APAR = PAR \cdot (-0,161 + 1,257NDVI) \quad (4.33)$$

em que PAR ($W \text{ m}^{-2}$) é a radiação fotossinteticamente ativa incidente, obtida pela Equação 4.34 proposta por Bastiaanssen e Ali (2003).

$$PAR = 0,48 \cdot K_i \quad (4.34)$$

em que a K_i ($W \text{ m}^{-2}$) para o dia de interesse proveniente da estação meteorológica.

A ϵ (g C MJ^{-1}) é obtida por meio da Equação 4.35 proposta por Field et al. (1995), onde a FE é oriunda do balanço de energia, T_1 representa o efeito redutor das regiões mais frias no crescimento das plantas e T_2 corresponde a diminuição na ϵ quando a temperatura começa a divergir da ideal. T_2 é importante para regiões áridas e semiáridas. $\epsilon_{\text{máx}}$ é um fator que representa a eficiência máxima do uso da luz pelas plantas sob condições ótimas de temperatura, sendo adotado o valor de $2,5 \text{ g C MJ}^{-1}$ conforme proposto por Silva et al. (2013).

$$\epsilon = \epsilon_{\text{máx}} \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot \text{FE} \quad (4.35)$$

A FE foi obtida (Equação 4.36) com base nos valores instantâneos de R_n (W m^{-2}), G (W m^{-2}), e LE (W m^{-2}) calculados a partir da metodologia do METRIC.

$$\text{FE} = \frac{LE}{(R_n - G)} \quad (4.36)$$

T_1 e T_2 são calculados pela Equação 4.37 e Equação 4.38 respectivamente:

$$T_1 = 0,8 + 0,02T_{\text{otm}} - 0,0005T_{\text{otm}}^2 \quad (4.37)$$

$$T_2 = \frac{1}{1 + \exp(0,2T_{\text{otm}} - 10 - T_{\text{ar}})} \cdot \frac{1}{1 + \exp[0,3(-T_{\text{otm}} - 10 + T_{\text{ar}})]} \quad (4.38)$$

onde T_{otm} ($^{\circ}\text{C}$) é a temperatura média do ar no mês de máximo NDVI. A verificação foi feita utilizando o produto de NDVI (MOD13A1) do MODIS. T_{ar} ($^{\circ}\text{C}$) é a temperatura média diária do ar no dia de interesse.

A metodologia para obtenção da $\text{GPP}_{\text{B.A.}}$ foi implementada na linguagem R e os dados meteorológicos necessários foram provenientes da estação meteorológica utilizada na aplicação do modelo METRIC. A GPP foi gerada para os anos de 2011, 2012, 2015 e 2016.

4.6 Obtenção da WUE

A WUE foi obtida por meio da Equação 2.4. Primeiramente a $\text{WUE}_{\text{B.A./METRIC}}$ foi estimada pela razão do $\text{GPP}_{\text{B.A.}}$ e a ET_a do METRIC. Em seguida a

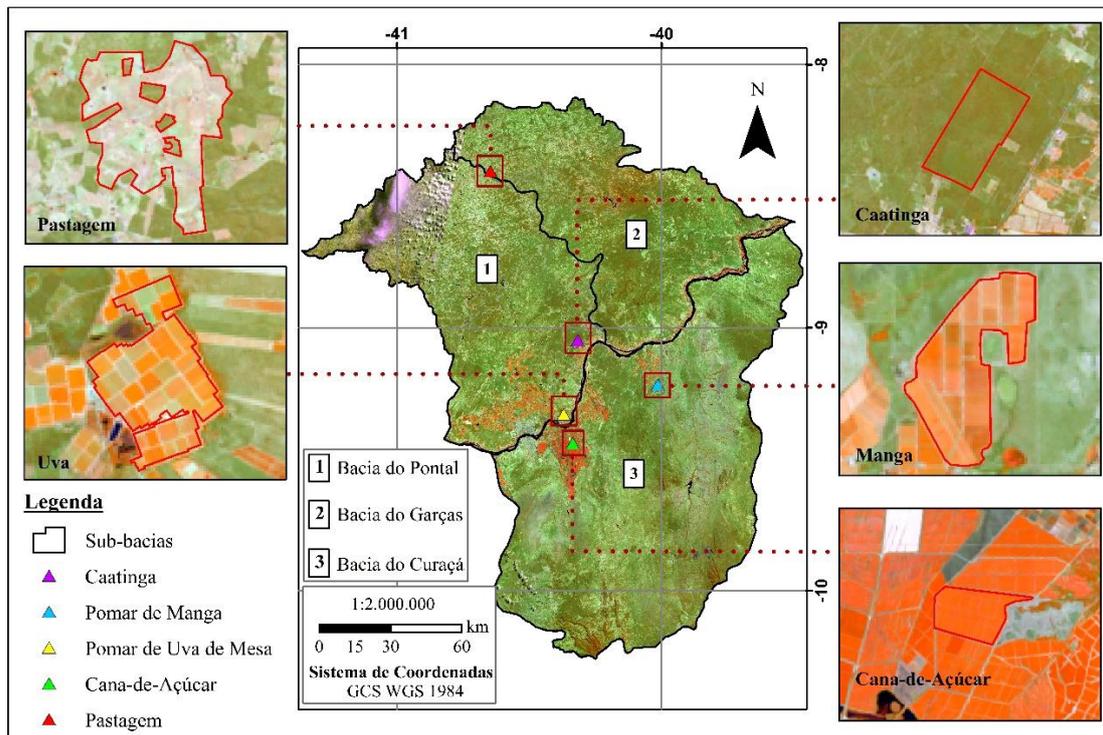
WUE_{MOD17/MOD16} foi calculada pela razão dos produtos MOD17A2H e MOD16A2 provenientes do MODIS. A WUE foi obtida para os anos de 2011, 2012, 2015 e 2016.

4.7 Dados de uso e cobertura da terra

Utilizando a plataforma GEE, foram mapeados seis importantes usos e coberturas da terra na área de estudo utilizando imagens do sensor OLI/Landsat-8. Os tipos de cobertura da terra mapeados foram cinco: Caatinga (~421 ha), cana-de-açúcar (~120 ha), pastagem (~554 ha), pomares de manga (~160 ha) e uva (~185 ha) (Figura 4.2). Por meio de verificação visual nas imagens do GEE confirmou-se que apenas estas coberturas estavam na região mapeada durante os anos de 2015 e 2016. A área de Caatinga foi mapeada na área da torre micrometeorológica utilizada, a área de cana-de-açúcar foi delimitada na área do sítio CAN, já a área de pastagem foi definida por meio do mapa de cobertura da terra do MapBiomas versão 3.0 de 2015 e 2016 (PROJETO MAPBIOMAS, 2019) e por inspeção visual das imagens Landsat do GEE. Os pomares de manga e de uva foram mapeados por inspeção visual utilizando imagens OLI e foi realizada uma visita de campo aos mesmos em julho de 2018.

O pomar de manga (Figura 4.3) utilizado pertence a Ibacem Agrícola Comércio e Exportação situada no município de Juazeiro/BA no perímetro irrigado de Curaçá. As cultivares de manga utilizadas na área são *Tommy Atkins*, *Kent*, *Palmer* e *Keitt*, sendo utilizados os sistemas de irrigação por gotejamento e por microaspersão. Havia áreas na fazenda que as cultivares do tipo *Tommy* possuíam 31 anos e estas abasteciam o mercado europeu.

Figura 4.2 – Localização das coberturas mapeadas.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.3 – Fotografias da área de manga da Ibacem Agrícola Comércio e Exportação em julho de 2018.



(continua)



Fonte: Produção do autor.

A área de uva de mesa (Figura 4.4) pertence a fazenda Vale das Uvas que faz parte do grupo de fazendas Labrunier localizada no município de Petrolina/PE. Os sistemas de irrigação na área são gotejamento e microaspersão. A colheita é realizada entre os meses de setembro e outubro. As cultivares utilizadas na área são: *Sweet Celebration*, *Sugar Crisp*, *Red Globe*, *Cotton Candy*, *Sweet Safari*, *Sweet Jubilee*, *Sweet Sunshine*, *Vitória*, *Jack Salute* e *Timco*.

Figura 4.4 – Fotografias da área de uva de mesa da Fazenda Vale das Uvas em julho de 2018.



Fonte: Produção do autor.

Após o mapeamento dos tipos de cobertura da terra, foram extraídos os perfis temporais para o período de junho/2015 até junho/2016 para os produtos: TRMM, NDVI, ET_a , GPP e WUE. Para análise das áreas mapeadas, apenas

foram utilizados os *pixels* puros (500 m x 500 m) em cada cobertura conforme Oliveira (2014, 2018).

4.8 Análises estatísticas

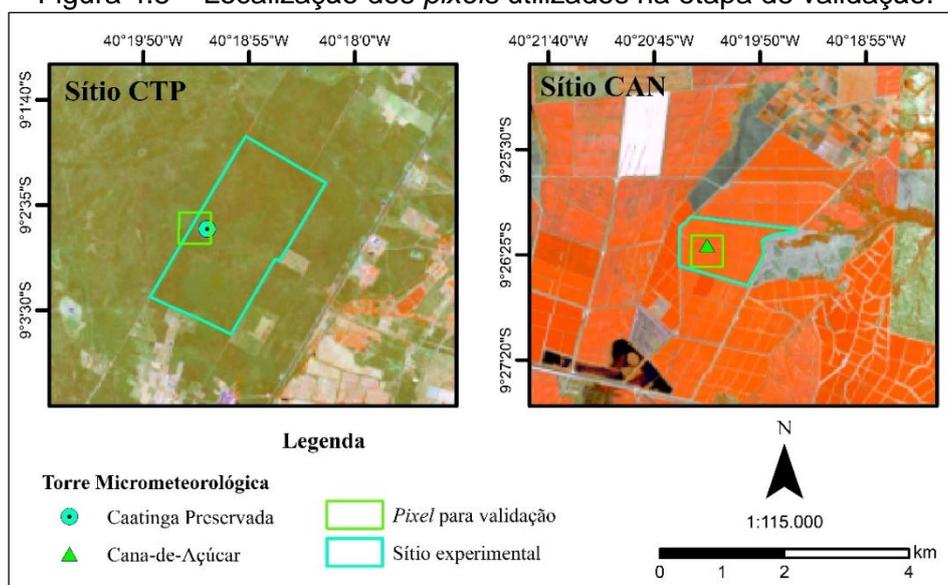
Para a etapa de validação dos valores estimados de ET_a , WUE , α , LST e IAF . Comparou-se os dados estimados com as medidas obtidas nos sítios experimentais CTP e CAN. Foram extraídos os valores do *pixel* (500 m x 500 m) no local em que cada torre está localizada (Figura 4.5). Para avaliar a acurácia dos valores estimados foram utilizados os índices: R^2 obtido de uma regressão linear, coeficiente de correlação de Pearson (r), *bias* (Equação 4.39), o erro relativo médio (MRE) (Equação 4.40) e a RMSE (Equação 4.41). Nas equações, n é o número de amostras e X representa as variáveis analisadas.

$$bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{\text{estimado}} - X_{\text{observado}}) \quad (4.39)$$

$$MRE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_{\text{estimado}} - X_{\text{observado}}}{X_{\text{observado}}} \right| \quad (4.40)$$

$$RMSE = \sqrt{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{\text{estimado}} - X_{\text{observado}})^2 \right]} \quad (4.41)$$

Figura 4.5 – Localização dos *pixels* utilizados na etapa de validação.



Fonte: Produção do autor.

O R^2 indica a “força” da equação de regressão linear gerada entre os valores estimados e observados, ou seja, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. O r mede o grau da relação linear entre a variável estimada e a observada (variando de -1 a 1), além disso indica a direção da possível relação. A relação é mais forte quando mais se aproxima de -1 (correlação negativa ou inversa) ou 1 (correlação positiva), o $r = 0$ indica que a relação linear entre as variáveis é nula. O *bias* é ao valor médio dos desvios entre os valores estimados e observados, indicando se os dados modelados superestimam ou subestimam os reais. Já o MRE é o valor, em porcentagem, da acurácia dos valores estimados. O RMSE mede a magnitude do erro nos valores estimados, variando de 0 a infinito. Quanto mais próximo o RMSE estiver de 0 mais cerca dos valores observados estarão os estimados. Estes índices foram escolhidos por serem bastante utilizados em estudos com objetivo de comparar pares de variáveis e avaliar os erros (DE OLIVEIRA et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2018; ZHANG et al., 2015).

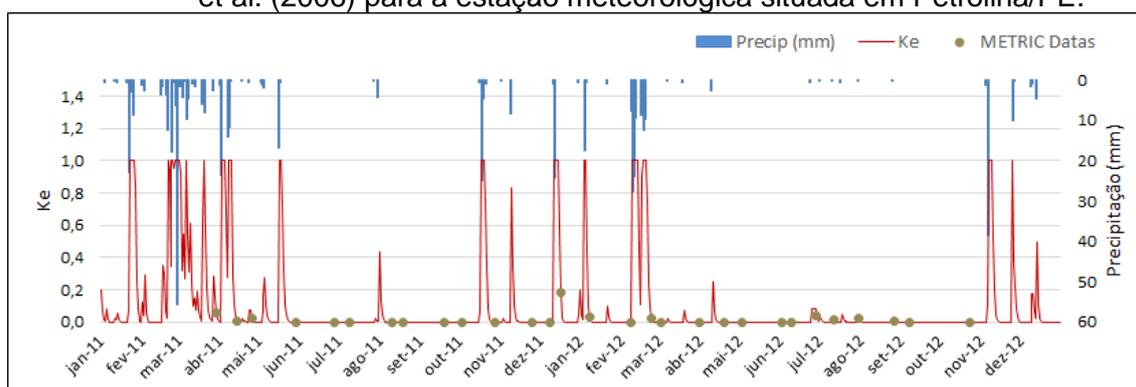
Para verificar a diferenciação entre os perfis temporais para cada tipo de uso e cobertura da terra mapeado para os dados de NDVI, ET_a , GPP e WUE no Item 5.5 foi utilizado o teste não paramétrico de Mann-Whitney (5%) (WILCOXON, 1946) para cada dia processado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

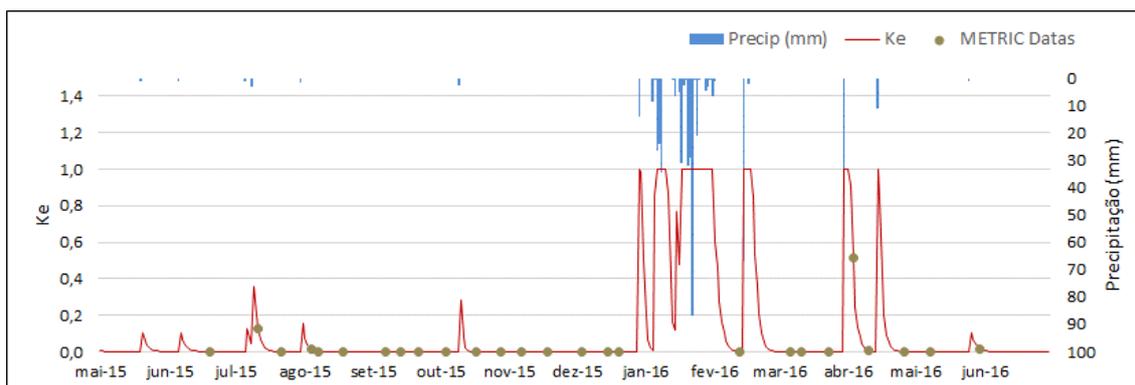
5.1 Balanço hídrico do solo exposto

A Figura 5.1 mostra o balanço hídrico para o solo exposto na área da estação meteorológica que forneceu os dados de entrada para o METRIC e o K_e que foi utilizado na etapa de calibração do modelo no cálculo fluxo de calor latente do *pixel* quente. Nota-se que em 2011-2012 o solo estava úmido em quase todo o período chuvoso (novembro até abril), já entre 2015-2016 o solo estava mais úmido em janeiro e fevereiro na região de estudo. Nestes períodos foi difícil aplicar o modelo METRIC, já que quanto maior a umidade no solo ocorria uma menor diferenciação entre as áreas úmidas e secas, consequentemente dificultava a etapa de seleção dos *pixels* âncoras. Outro fator limitante observado foi que quando o solo estava a muitos dias em condições de escassez hídrica o modelo METRIC não conseguia terminar o processo iterativo de calibração, esse comportamento também foi retratado por Allen et al. (2010). Por isso todas as datas utilizadas foram em dias que o solo não estava com umidade saturada ou em dias que eram precedidos de um período com grande escassez de umidade, como também quando não houve ausência de dados de precipitação na estação meteorológica para o dia de interesse.

Figura 5.1 – Balanço hídrico para o solo exposto, feito pelo modelo descrito por Allen et al. (2006) para a estação meteorológica situada em Petrolina/PE.



(continua)



Fonte: Produção do autor.

5.2 Validação dos produtos MODIS, METRIC e WUE

5.2.1 IAF

De acordo com a Tabela 5.1, tanto os valores estimados pelo MOD15A2H quanto pelo METRIC subestimaram os valores observados nos sítios CTP ($MRE_{MOD15A2H} = -63\%$ e $MRE_{METRIC} = -71\%$) e CAN ($MRE_{MOD15A2H} = -54\%$ e $MRE_{METRIC} = -54\%$). Na CTP os melhores valores estimados foram encontrados pelo MOD15A2H ($bias = -1,19 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e $RMSE = 1,29 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) variando entre $0,10 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e $2,60 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ já os observados entre $1,26 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e $5,62 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Na CAN os valores do $IAF_{MOD15A2H}$ ficaram entre $0,70 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e $2,90 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, já os observados compreenderam $1,27 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e $9,92 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$; ainda no mesmo sítio os do IAF_{METRIC} estiveram entre $0,72 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e $4,46 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, e os observados entre $1,96 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e $9,76 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. De la Fuente-Sáiz et al. (2017) avaliaram o IAF proveniente do METRIC para um pomar irrigado de maçã (*Malus domestica* cv. Pink Lady) no Chile e observou que o IAF estimado subestimou as medidas de campo em 59% com um RMSE de $0,2 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Chen et al. (2017) obtiveram um RMSE de $0,80 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ validando o $IAF_{MOD15A2H}$ numa área de floresta não-conífera e Yan et al. (2016) um RMSE de $0,73 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Deve-se salientar que as medidas de IAF em campo foram feitas às 12:00 (horário local, 15:00 GMT) e isso pode influenciar nos resultados da validação, já que tanto o MOD15A2H quanto o IAF_{METRIC} são estimados para o horário da passagem do MODIS/Terra (~10:30). Porém se espera que no produto MOD15A2H os erros na estimativas da LAI sejam referentes aos dados de entrada e as constantes do mapa de biomas para classificação da vegetação global. Os erros atribuídos ao

IAF_{METRIC} podem ser da própria equação já que esta foi gerada para áreas de agricultura irrigada no sul de Idaho.

Tabela 5.1 – Acurácia do IAF estimado pelo MOD15A2H e pelo modelo METRIC para os sítios experimentais CTP e CAN.

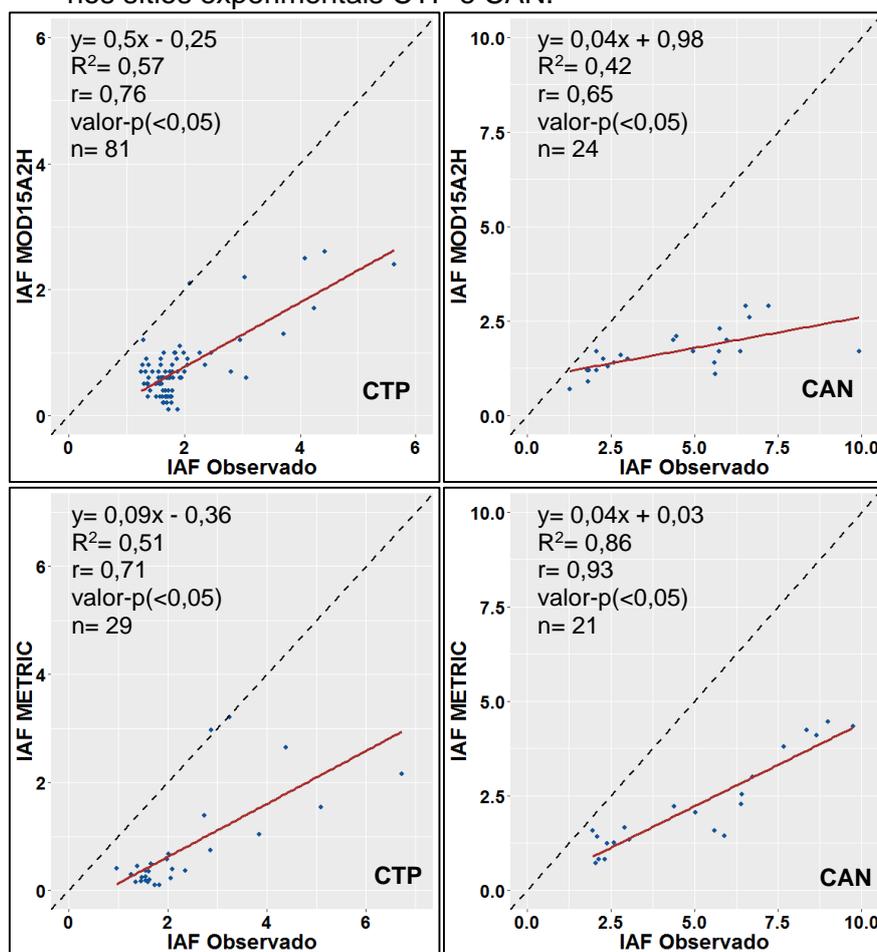
	CTP		CAN	
	MOD15A2H	METRIC	MOD15A2H	METRIC
Média Observada	1,92	2,3	4,3	5
Média Estimada	0,73	0,77	1,68	2,23
<i>bias</i>	-1,19	-1,53	-2,62	-2,79
RMSE	1,29	1,77	3,24	3,18
MRE (%)	-63	-71	-54	-54
R ²	0,57	0,51	0,42	0,86
r	0,76	0,71	0,65	0,93

RMSE é a raiz erro médio quadrático; MRE (%) é o erro relativo médio em porcentagem; * indica p-value >0,05.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.2 mostra que o melhor modelo de regressão linear gerado foi para o IAF_{METRIC} do sítio CAN (R²= 0,86). O R² dos outros modelos de regressão linear obtidos foram 0,42 (IAF_{MOD15A2H} - CAN), 0,51 (IAF_{METRIC} - CTP) e 0,57 (IAF_{MOD15A2H} - CTP). Quando analisa-se a correlação entre as variáveis, os melhores e piores resultados foram encontrados no sítio CAN com r= 0,93 (IAF_{METRIC}) e r= 0,65 (IAF_{MOD15A2H}). No sítio CTP os valores foram r= 0,76 (IAF_{MOD15A2H}) e r= 0,71 (IAF_{METRIC}). Conforme o trabalho de Hopkins (2000), valores de r > 0,5, as variáveis analisadas possuem uma alta correlação e acima de 0,9 apresentam uma correlação quase perfeita. Diante dos valores de r obtidos, se observa que mesmo os valores estimados subestimando os valores reais, ambos produtos podem ser utilizados uma vez que possuem uma boa correlação com os dados de campo.

Figura 5.2 – Comparação entre o IAF estimado (MOD15A2H e METRIC) e observado nos sítios experimentais CTP e CAN.



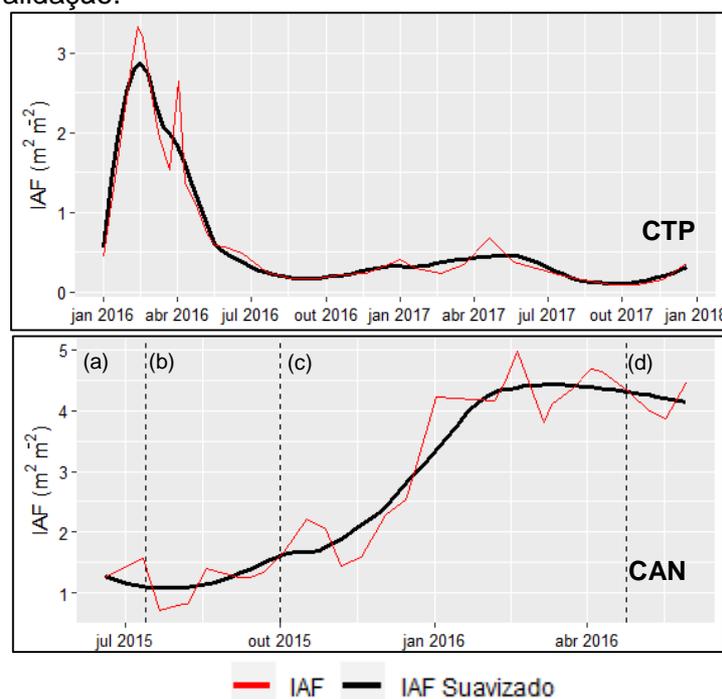
Fonte: Produção do autor.

Na Figura 5.3 são apresentados os perfis temporais de IAF estimados pelo METRIC, podendo-se observar que no sítio CTP o IAF variou conforme os eventos de precipitação na área. Nota-se na CTP que os maiores valores de IAF foram encontrados no período chuvoso (novembro – abril) e os menores no seco (maio – outubro). Os acentuados picos de IAF encontrados no sítio CTP durante os meses de janeiro/2016 – abril/2016 foram decorrentes das constantes chuvas que aconteceram na região, a estação meteorológica de Petrolina registrou totais mensais de 442,5 mm durante estes quatro meses sendo que só em janeiro/2016 registrou-se 327,2 mm de chuva. Na análise do perfil temporal do IAF para CTP o maior valor estimado foi $\sim 3,33 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (fevereiro/2016) e o menor $\sim 0,1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (setembro/2017). Deve-se ressaltar o quanto a vegetação de Caatinga no sítio avaliado respondeu em desenvolvimento de sua área foliar durante os elevados valores de precipitação

que aconteceram na quadra chuvosa de 2016 (janeiro – abril) apresentando IAF entre $0,45 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e $3,33 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, diferente da quadra chuvosa de 2017 que registrou-se valores acumulados de 126,6 mm de chuva tendo valores mais modestos variando entre $0,24 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e $0,67 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$.

Ainda na Figura 5.3, no sítio CAN os valores de IAF acompanharam o desenvolvimento da cultura no campo alcançando seu pico em fevereiro/2016 com valor $4,97 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, após este mês houve uma leve queda e estabilização dos valores. Com o início do período de maturação, no final do mês de abril, os valores de IAF começaram a cair devido à suspensão da irrigação no campo, como também no mesmo período se encerra o período de chuvas na região.

Figura 5.3 – Perfil temporal do IAF estimado pelo METRIC para os sítios experimentais (CTP e CAN) durante os períodos utilizados para o processo de validação.



No sítio CAN as letras em destaque representam os respectivos estágios fenológicos da cana-de-açúcar no campo: (a) Fase I – brotação e estabelecimento (13/06/2015 até 13/07/2015), (b) Fase II – perfilhamento (14/07/2015 até 01/10/2015), (c) Fase III – máximo crescimento (02/10/2015 até 24/04/2016) e (d) Fase IV – maturação (25/04/2016 até 17/06/2016). As linhas tracejadas marcam as datas finais para cada estágio.

Fonte: Produção do autor.

5.2.2 Albedo da superfície

A Tabela 5.2 mostra que a acurácia do α estimado (α_{MODIS}) nos sítios experimentais apresenta valores muito próximos aos observados ($\alpha_{\text{Obs.}}$) com valores médios de 0,11 ($\pm 0,01$) na CTP e 0,14 ($\pm 0,02$) na CAN. Na CTP o α_{MODIS} variou entre 0,09 e 0,14 durante o período estudado. Já na CAN os valores estimados estiveram no intervalo de 0,10 e 0,20. Na CTP o α_{MODIS} subestimou os valores do $\alpha_{\text{Obs.}}$. Com MRE= -0,28% e RMSE= 0,01. Já na CAN os valores do α_{MODIS} superestimaram com um MRE= 3,82% e RMSE= 0,01. Conforme a Tabela 5.2 os valores na CTP estão mais próximos aos observados que na CAN.

Tabela 5.2 – Acurácia do albedo (α) estimado para os sítios experimentais CTP e CAN.

	CTP	CAN
Média Observada	0,11	0,14
Média Estimada	0,11	0,15
<i>bias</i>	-0,001	0,01
RMSE	0,01	0,01
MRE (%)	-0,28	3,82
R ²	0,35	0,83
r	0,59	0,91

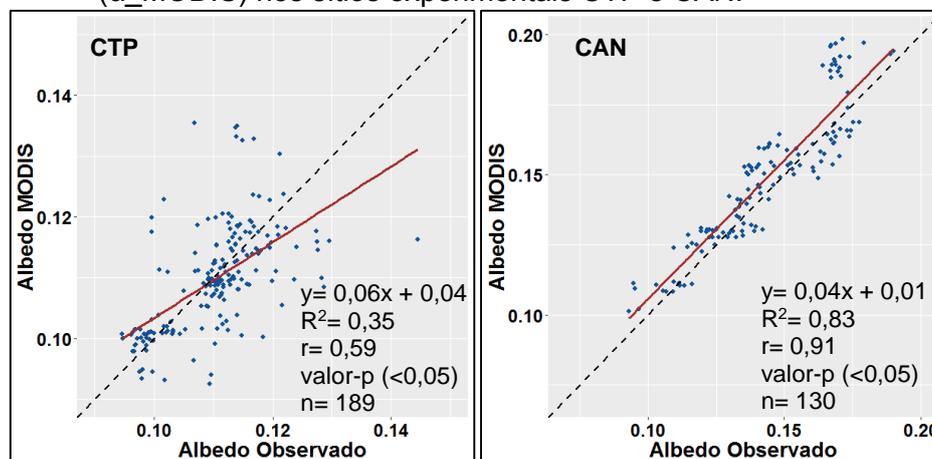
RMSE é a raiz erro médio quadrático; MRE (%) é o erro relativo médio em porcentagem; * indica p-value >0,05.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.4 mostra em gráfico o resultado da análise de regressão para o α_{MODIS} e $\alpha_{\text{Obs.}}$ nos sítios experimentais, o modelo de regressão linear para o sítio CAN consegue mostrar bem a relação entre as variáveis com R² de 0,83. O R² no sítio CTP foi de 0,35, este baixo valor pode ser explicado devido a pouca variação que os dados de albedo possuem, como mostrado pelo DP que foi de ~0,01, amplitude de 0,04 e variância de ~0,0001 para os valores do α_{MODIS} . Quanto a correlação entre os dados estimados e observados, o sítio CAN apresentou um alto coeficiente de correlação de Pearson (r= 0,91) e o

sítio CTP apresentou $r = 0,59$. Os valores de r encontram-se no intervalo dos obtidos por Gascoin et al. (2017) que ficaram entre 0,47 e 0,90.

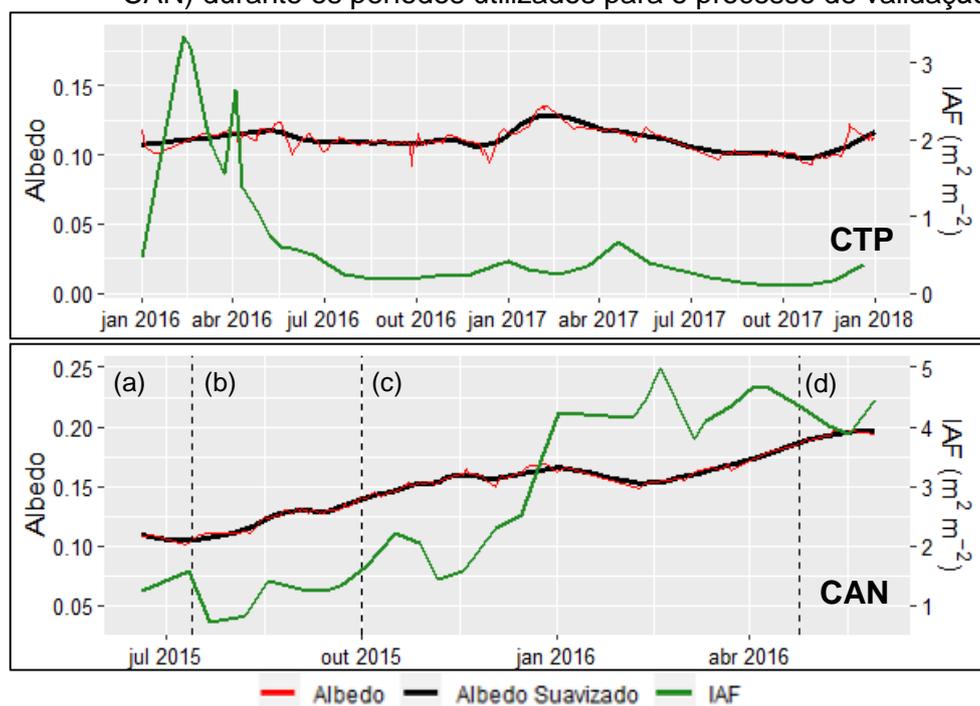
Figura 5.4 – Comparação entre o albedo observado (α_{Obs}) e o albedo estimado (α_{MODIS}) nos sítios experimentais CTP e CAN.



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 5.5 observa-se que no sítio CTP houve pouca variação nos valores estimados de albedo mesmo no período que apresentou os maiores valores de IAF (de janeiro/2016 até abril/2016), neste intervalo o albedo variou de 0,10 á 0,12. O albedo médio na Caatinga foi 0,11 no período chuvoso (novembro até abril) e seco (maio até outubro). Os anos de 2016 e 2017 apresentaram baixos valores de precipitação, o que acabou impactando na vegetação da área estudada. Por isso, mesmo no período chuvoso, a planta não apresentou maiores valores de albedo, visto que este tende a subir com o aumento do número de folhas na vegetação da Caatinga. Tanto no período seco quanto no chuvoso os valores pouco variaram. Nota-se que no sítio CAN os valores de albedo aumentaram conforme o desenvolvimento da cultura (aumento do IAF), comportamento semelhante foi observado por Oliveira et al. (2015) e André et al. (2010). Os valores médios de albedo nas fases I, II, III e IV foram 0,11, 0,13, 0,16 e 0,19; já no período de todo o experimento foi 0,15. Observa-se que o maior albedo médio por fase foi encontrado na maturação, o que aconteceu devido a presença de folhas secas (palhada), o que tende a aumentar a reflectância do dossel.

Figura 5.5 – Perfil temporal do albedo MODIS para os sítios experimentais (CTP e CAN) durante os períodos utilizados para o processo de validação.



No sítio CAN as letras em destaque representam os respectivos estágios fenológicos da cana-de-açúcar no campo: (a) Fase I – brotação e estabelecimento (13/06/2015 até 13/07/2015), (b) Fase II – perfilhamento (14/07/2015 até 01/10/2015), (c) Fase III – máximo crescimento (02/10/2015 até 24/04/2016) e (d) Fase IV – maturação (25/04/2016 até 17/06/2016). As linhas tracejadas marcam as datas finais para cada estágio.

Fonte: Produção do autor.

5.2.3 Temperatura da superfície

A Tabela 5.3 mostra a acurácia do LST MODIS, notando-se que os valores fornecidos pelo produto MOD11A1 superestimaram os observados (MRE = 5,27%; RMSE= 3,44 °C). A média observada foi 32,8 °C, já a estimada foi de 34,6 °C (*bias*= 1,77 °C). Os valores estimados ficaram entre 22,07 °C e 43,87 °C, enquanto na torre os valores registrados estiveram entre 24,18 °C e 39,88 °C. Durante a maior parte do ano a Caatinga esta sem folhas uma vez que começa a perdê-las com a redução das chuvas na região, por isso os valores do LST apresentaram uma boa concordância com a T_s .

Tabela 5.3 – Acurácia da LST estimada para o sítio experimental CTP.

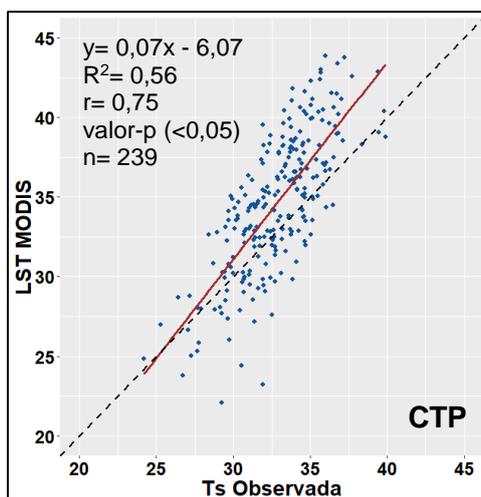
Média Observada	Média Estimada	bias	RMSE	MRE (%)	R ²	r
32,8	34,6	1,77	3,44	5,27	0,56	0,75

RMSE é a raiz erro médio quadrático; MRE (%) é o erro relativo médio em percentagem; * indica p-value >0,05.

Fonte: Produção do autor.

Na Figura 5.6 é apresentado o resultado da análise de regressão entre a temperatura de superfície observada e o LST no sítio CTP. Observa-se que o modelo de regressão gerado mostra a relação entre as variáveis estudadas com um R² de 0,56, mas apresentou um r de 0,75 que Hopkins (2000) classifica como muito alta a correlação entre os dados avaliados.

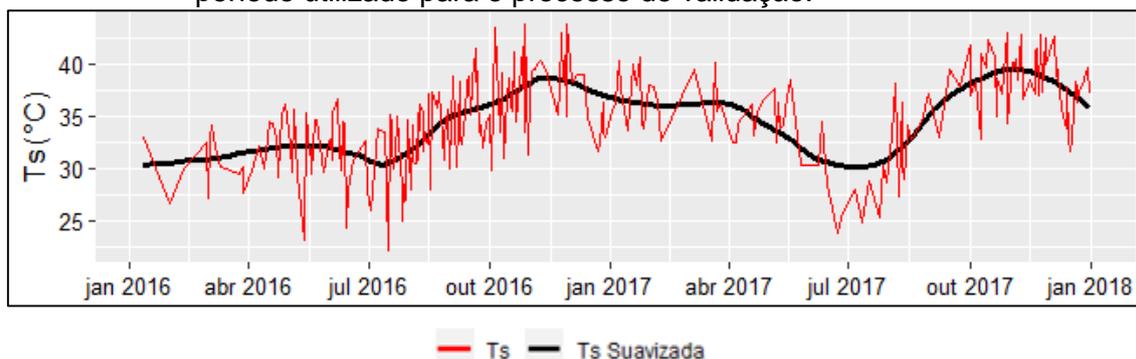
Figura 5.6 – Comparação entre a temperatura observada e o LST no sítio experimental CTP.



Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.7 mostra o perfil temporal da LST no sítio CTP, nota-se que no período chuvoso os valores variaram entre 26,65 °C e 43,87 °C tendo uma média de 36,17 °C. Já no período seco as temperaturas ficaram no intervalo de 22,07 °C e 43,75 °C, apresentando um valor médio de 33,55 °C. Em média os meses mais frios foram junho e julho, que coincidem com o período do solstício de inverno no hemisfério sul, já os mais quentes foram novembro e dezembro que coincidem com o solstício de verão no hemisfério sul.

Figura 5.7 – Perfil temporal da LST MODIS no sítio experimental CTP durante o período utilizado para o processo de validação.



Fonte: Produção do autor.

5.2.4 Evapotranspiração real

A Tabela 5.4 mostra a acurácia do produto MOD16A2 e da ET_a estimada pelo METRIC nos sítios experimentais, considerada como constante, para um período de 8 dias. Observa-se que os piores valores estimados foram encontrados no produto MOD16A2 nos dois sítios experimentais em comparação com o METRIC. Na CTP os valores observados variaram entre $1,92 \text{ mm } 8\text{dias}^{-1}$ e $3,30 \text{ mm } 8\text{dias}^{-1}$, já os estimados ficaram entre $21,77 \text{ mm } 8\text{dias}^{-1}$ e $40,10 \text{ mm } 8\text{dias}^{-1}$. No sítio CAN foram obtidos valores entre $37,63 \text{ mm } 8\text{dias}^{-1}$ e $65,88 \text{ mm } 8\text{dias}^{-1}$, bem acima dos estimados que ficaram entre $11,50 \text{ mm } 8\text{dias}^{-1}$ e $27,10 \text{ mm } 8\text{dias}^{-1}$. No sítio CTP o MOD16A2 superestimou os valores observados tendo um $MRE= 101\%$, $bias= 7,72 \text{ mm } 8\text{dias}^{-1}$ e $RMSE= 9,95 \text{ mm } 8\text{dias}^{-1}$, já na CAN os valores estimados subestimaram os observados apresentando um $MRE= -56,7$, $bias= -26,5 \text{ mm } 8\text{dias}^{-1}$ e $RMSE= 27,3 \text{ mm } 8\text{dias}^{-1}$. Os valores de RMSE apresentados no sítio CTP são próximos aos encontrados por Miranda et al. (2017), que obtiveram um RMSE de $2,18 \text{ mm } 8\text{dias}^{-1}$ e $1,99 \text{ mm } 8\text{dias}^{-1}$ para o sítio CTP em 2012.

De acordo com a Tabela 5.4, os valores estimados pelo METRIC ficaram próximos aos observados. Na CTP a média do acumulado para 8 dias da ET_a observada foi $7,45 \text{ mm } 8\text{dias}^{-1}$ e no METRIC foi $7,36 \text{ mm } 8\text{dias}^{-1}$. Na CAN a média estimada foi $46,8 \text{ mm } 8\text{dias}^{-1}$ e a observada $42,8 \text{ mm } 8\text{dias}^{-1}$. Verifica-se que os sítios CTP ($MRE= 8,3\%$ e $RMSE= 3,96 \text{ mm } 8\text{dias}^{-1}$) e CAN ($MRE= 11,5\%$ e $RMSE= 8,15 \text{ mm } 8\text{dias}^{-1}$) superestimaram os valores observados. Mesmo que os valores modelados tenham superestimado os reais, o METRIC

mostrou bons resultados. Os valores observados na CTP ficaram entre 2,20 mm 8dias⁻¹ e 21,77 mm 8dias⁻¹, enquanto as estimativas do METRIC ficaram entre 1,35 mm 8dias⁻¹ e 19,36 mm 8dias⁻¹. Na CAN os valores do METRIC estiveram no intervalo de 24,50 mm 8dias⁻¹ e 71,24 mm 8dias⁻¹ e os na torre compreenderam 19,23 mm 8dias⁻¹ e 57,85 mm 8dias⁻¹.

Tabela 5.4 – Acurácia do acumulado da ETa estimada pelo MOD16A2 e pelo modelo METRIC para os sítios experimentais CTP e CAN.

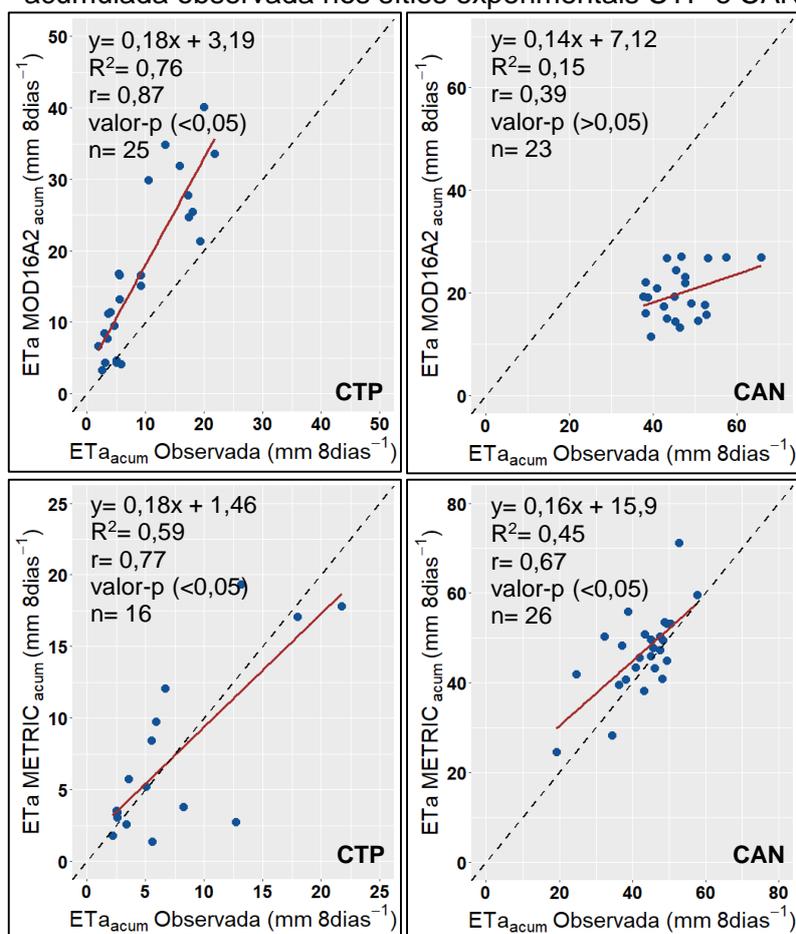
	CTP		CAN	
	MOD16A2	METRIC	MOD16A2	METRIC
Média Observada	9,22	7,45	45,4	42,8
Média Estimada	16,9	7,36	19,9	46,8
<i>Bias</i>	7,72	-0,09	-26,5	4,04
RMSE	9,95	3,96	27,3	8,15
MRE (%)	101	8,3	-56,7	11,5
R ²	0,76	0,59	0,15	0,45
r	0,87	0,77	0,39*	0,67

RMSE é a raiz erro médio quadrático; MRE (%) é o erro relativo médio em percentagem; * indica p-value >0,05.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.8 mostra a dispersão dos valores estimados e observados referentes ao acumulado de 8 dias da ET_a para os dois sítios experimentais. Nem todos os modelos de regressão gerados conseguiram se ajustar bem aos dados conforme se observa pelo R². Para o MOD16A2H o R² nos sítios CTP e CAN foram respectivamente 0,76 e 0,15, porém quando analisou-se o coeficiente de correlação (r) notou-se que os valores estimados na CAN para o produto do MODIS não apresentaram correlação com os dados observados. Conforme a Figura 5.8 o modelo de regressão do METRIC para o sítio CTP mostrou um bom ajuste (R²= 0,75), porém este foi baixo para o sítio CAN (R²= 0,45). Quanto a correlação o modelo METRIC apresentou uma boa concordância com os dados reais, tendo valores de r 0,77 e 0,67 na CTP e CAN respectivamente.

Figura 5.8 – Comparação entre a ET_a acumulada estimada (MOD16A2 e METRIC) e a acumulada observada nos sítios experimentais CTP e CAN para 8 dias.



Fonte: Produção do autor.

Na Tabela 5.5 são apresentados os resultados da análise da acurácia para a ET_a para os dados estimados e observados. Nota-se que a ET_a oriunda do MOD16A2 na CTP superestimou (MRE= 177% e RMSE= 1,31 mm dia⁻¹) os valores observados e na CAN subestimou (MRE= -58,1% e RMSE= 3,03 mm dia⁻¹). Ressalta-se que a ET_a do produto MOD16A2 foi gerada a partir de um acumulado de 8 dias, na qual considerou-se que a ET_a foi constante ao longo destes dias. O METRIC superestimou os dados observados nos sítios CTP (MRE= 16,4% e RMSE= 0,31 mm dia⁻¹) e CAN (MRE= 3,0% e RMSE= 0,45 mm dia⁻¹), porém seus valores foram bem próximos aos observados. Na CAN a ET_a média estimada pelo METRIC para o período do experimento variou entre 2,98 mm dia⁻¹ e 8,91 mm dia⁻¹, com um valor médio de 5,75 mm dia⁻¹ ($\text{bias} = 0,09$). Valores próximos aos observados que variaram entre 2,79 mm dia⁻¹ e 8,91 mm dia⁻¹, com um valor médio da ET_a observada de 5,66 mm dia⁻¹. Os

valores médios da ET_a estimados pelo METRIC na CAN são próximos aos obtidos por Carvalho et al. (2018) e Silva et al. (2012) que, respectivamente, foram $5,57 \text{ mm dia}^{-1}$ e $4,7 \text{ mm dia}^{-1}$ na mesma Usina do sítio experimental CAN utilizando dados provenientes de uma torre micrometeorológica. No sítio CTP os valores modelados a partir do METRIC ficaram entre $0,17 \text{ mm dia}^{-1}$ e $2,42 \text{ mm dia}^{-1}$, enquanto os observados encontraram-se entre $0,14 \text{ mm dia}^{-1}$ e $3,28 \text{ mm dia}^{-1}$. Para a CTP a ET_a média estimada foi $0,69 \text{ mm dia}^{-1}$ ($bias = -0,04$), valor próximo ao encontrado por Souza et al. (2015) que comentam que a ET_a para a Caatinga apresenta valores em torno de $0,5 \text{ mm dia}^{-1}$ no sítio CTP. Carvalho et al. (2018) no mesmo local estudado obtiveram valores de ET_a para a Caatinga entre $0,9 \text{ mm dia}^{-1}$ e $3,1 \text{ mm dia}^{-1}$ no intervalo de junho/2015 e maio/2016.

Tabela 5.5 – Acurácia da ET_a estimada pelo MOD16A2 e pelo modelo METRIC para os sítios experimentais CTP e CAN.

	CTP		CAN	
	MOD16A2	METRIC	MOD16A2	METRIC
Média Observada	1,08	0,73	6,03	5,66
Média Estimada	2,12	0,69	2,48	5,75
<i>bias</i>	1,04	-0,04	-3,55	0,09
RMSE	1,31	0,31	3,74	0,45
MRE (%)	177	16,4	-58,1	3,0
R^2	0,68	0,95	0,05	0,90
r	0,82	0,97	0,21*	0,95

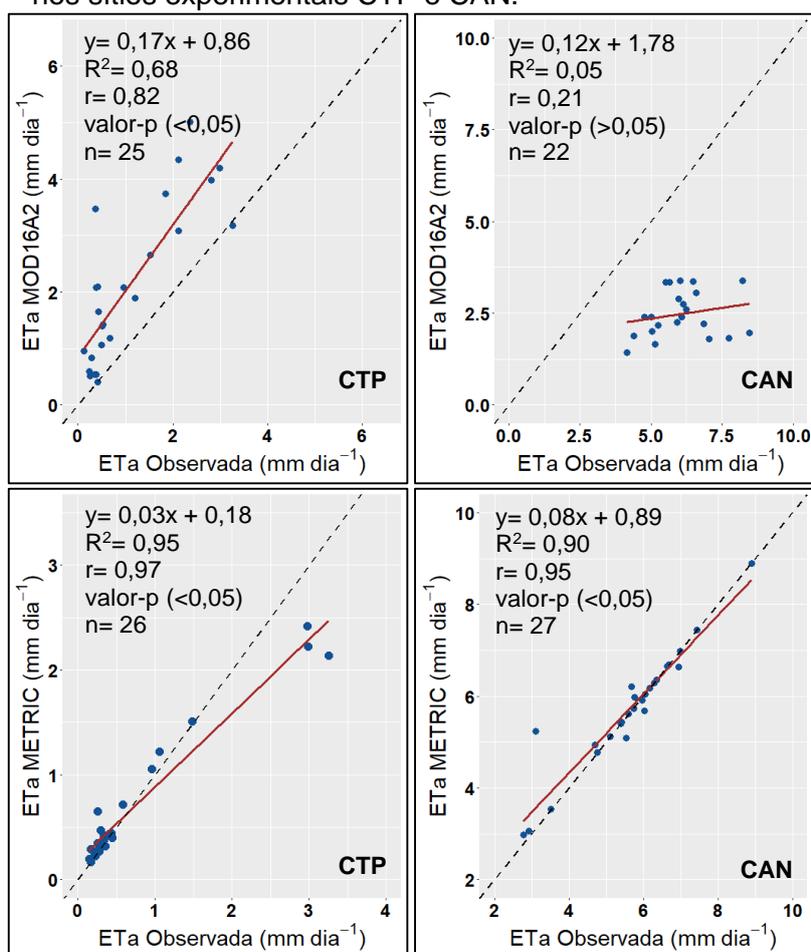
RMSE é a raiz erro médio quadrático; MRE (%) é o erro relativo médio em porcentagem; * indica $p\text{-value} > 0,05$.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.9 mostra os gráficos de dispersão dos valores diários da ET_a estimada (MOD16A2 e METRIC) e observados. Os melhores ajustes foram obtidos pelo modelo METRIC com valores de R^2 de 0,95 (CTP) e 0,90 (CAN), como também de correlação com valores de r 0,97 (CTP) e 0,95 (CAN). Oliveira et al. (2018) validaram a ET_a do METRIC com três torres micrometeorológicas e obtiveram os seguintes valores de R^2 : 0,94 (área de

cana-de-açúcar, RMSE= 0,35 mm dia⁻¹), 0,88 (área de cerrado denso, RMSE= 0,87 mm dia⁻¹) e 0,96 (área de cerrado *sensu-stricto*, RMSE= 0,75 mm dia⁻¹). Quanto aos modelos de regressão gerados para o MOD16A2, ocorreu a mesma situação que para os acumulados de 8 dias. Para o sítio CTP o produto MODIS teve alta correlação com os dados de campo ($r= 0,82$) e o modelo de regressão apresentou um bom ajuste com $R^2= 0,68$.

Figura 5.9 – Comparação entre a ET_a estimada (MOD16A2 e METRIC) e observada nos sítios experimentais CTP e CAN.



Fonte: Produção do autor.

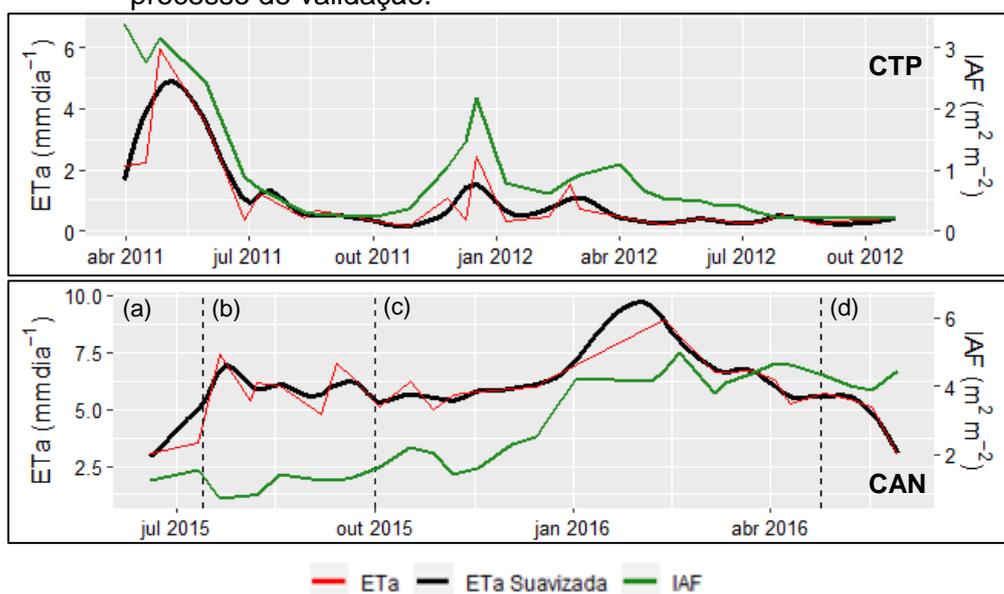
É importante destacar que o bom ajuste do modelo METRIC deve-se, principalmente, a seleção dos *pixels* âncoras (CARRASCO-BENAVIDES et al., 2014; NUMATA et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2018). Para a região de estudo houve uma grande dificuldade para seleção dos *pixels* candidatos entre os meses de dezembro e maio, os quais definem o início do período chuvoso (dezembro) e início do período seco (maio). A dificuldade neste período se deu

pelo fato de que os solos estão úmidos, a vegetação natural está em desenvolvimento e a temperatura da superfície nas áreas irrigadas aproxima-se das áreas não agrícolas nas quais o solo tem pouca vegetação. Estas condições dificultam a busca pelos *pixels* quentes e frios adequados, porque a amplitude de dT na área de estudo torna-se mais restrita, o que acaba influenciando no processo de calibração. Outro problema do METRIC foi o aparecimento de valores negativos de ET_a . Estes valores negativos de ET_a , podem aparecer em áreas desérticas conforme mencionado por Allen et al. (2010), mesmo a área de estudo não sendo considerado uma, esse problema ocorreu devido ao METRIC quando calibrado produzir valores próximos a 0 de ET_a para solos expostos em áreas agrícolas. Devido a isso, *pixels* com altos valores de temperatura de superfície podem superestimar os valores da modelagem do H e assim produzir valores negativos de ET_a . Com relação ao MOD16A2 os erros encontrados podem estar relacionados com os dados de entrada no modelo como tipos de cobertura da terra, IAF/FPAR, as constantes presentes na tabela BPLUT para os tipos de cobertura da terra da região e com os dados meteorológicos de reanálise.

A Figura 5.10 mostra que durante o período validado no sítio CTP, por ser a vegetação da área dependente dos eventos de precipitação para seu desenvolvimento, houve diferenças entre o comportamento da ET_a em 2011 e 2012. Conforme mostrado na Figura 5.1, foram registrados na estação de Petrolina um acumulado anual de precipitação de 335,50 mm para 2011 e em 2012 de 182,40 mm sendo, este último, considerado um ano de seca conforme Marengo et al. (2018) e Souza et al. (2018). Em 2011, no sítio CTP a maior disponibilidade hídrica ocorreu durante os meses de março e maio de 2011 que compreendeu os meses finais do período chuvoso e início do seco. Após esse período os valores tenderam a cair tendo a ET_a valores entre $0,17 \text{ mm dia}^{-1}$ e $2,42 \text{ mm dia}^{-1}$. Durante os meses de junho/2011 e outubro/2012 foi registrada uma precipitação acumulada de 201,2 mm na região, devido à essa elevada restrição hídrica a vegetação do sítio CTP foi fortemente afetada. No sítio CAN por ser uma área irrigada apresentou valores estimados de ET_a entre $-2,98 \text{ mm dia}^{-1}$ e $-8,95 \text{ mm dia}^{-1}$, a cultura não sofreu impacto da escassez hídrica

durante o período seco de 2015 como é observado no gráfico. Na Fase I os valores ficaram entre $3,06 \text{ mm dia}^{-1}$ e $3,54 \text{ mm dia}^{-1}$; já na Fase II estiveram no intervalo de $4,78 \text{ mm dia}^{-1}$ e $7,44 \text{ mm dia}^{-1}$; Fase III entre $4,94 \text{ mm dia}^{-1}$ e $8,95 \text{ mm dia}^{-1}$; e na Fase IV estes encontraram-se entre $2,98 \text{ mm dia}^{-1}$ e $5,69 \text{ mm dia}^{-1}$. Os valores são próximos aos encontrados na literatura por Silva et al. (2012) numa área comercial de cana-de-açúcar próxima ao sítio CAN, que na Fase I a ET_a , em média, oscilou entre 3 mm dia^{-1} , na Fase II apresentou uma ET_a média de $3,8 \text{ mm dia}^{-1}$, na Fase III uma ET_a média de $5,1 \text{ mm dia}^{-1}$ e na Fase IV uma ET_a de $3,1 \text{ mm dia}^{-1}$. Andrade Júnior et al. (2017) num talhão comercial de cana-de-açúcar obtiveram uma ET_a média diária nas Fases II, III e IV de $5,03$, $5,24$ e $5,29 \text{ mm dia}^{-1}$ respectivamente. Nota-se que a demanda hídrica da cultura aumentou a medida que foi desenvolvendo-se, principalmente, durante a fase de máximo crescimento (Fase III) que apresentou uma ET_a média de $6,95 \text{ mm dia}^{-1}$. Após atingir seu pico de ET_a , em fevereiro, ocorre uma queda nos valores da variável devido à suspensão da irrigação, como se observa no comportamento do IAF da cultura que começou a diminuir por volta do mês de abril. Na Fase IV com a suspensão da irrigação houve um maior acúmulo de sacarose nos colmos, o que levou na redução do IAF.

Figura 5.10 – Perfil temporal da ET_a diária estimada pelo METRIC para os sítios experimentais (CTP e CAN) durante os períodos utilizados para o processo de validação.



No sítio CAN as letras em destaque representam os respectivos estágios fenológicos da cana-de-açúcar no campo: (a) Fase I – brotação e estabelecimento (13/06/2015 até 13/07/2015), (b) Fase II – perfilhamento (14/07/2015 até 01/10/2015), (c) Fase III – máximo crescimento (02/10/2015 até 24/04/2016) e (d) Fase IV – maturação (25/04/2016 até 17/06/2016). As linhas tracejadas marcam as datas finais para cada estágio.

Fonte: Produção do autor.

5.2.5 WUE

Conforme apresentado na Tabela 5.6, os valores estimados se aproximaram dos valores observados de WUE no sítio CTP. A média da WUE_{MODIS} foi 1,95 ($bias = -0,47$ g C mm⁻¹ ET). Os valores da WUE_{MODIS} variaram entre 0,92 g C mm⁻¹ ET e 3,93 g C mm⁻¹ ET, enquanto os valores observados se encontraram entre 0,74 g C mm⁻¹ ET e 4,06 g C mm⁻¹ ET. De forma geral a WUE_{MODIS} subestimou (MRE = -10,2% e RMSE = 0,98 g C mm⁻¹ ET) os valores observados. Estes valores são próximos aos encontrados por de Oliveira et al. (2017) que validaram a WUE_{MODIS} utilizando dados de torres micrometeorológicas em duas bacias hidrográficas na região amazônica encontrando valores de $bias$ entre -0,14 g C mm⁻¹ ET e 0,02 g C mm⁻¹ ET, RMSE entre 0,24 g C mm⁻¹ ET e 0,42 g C mm⁻¹ ET, e MRE(%) entre 12% e 27,5%. Quando se avalia a $WUE_{B.A.METRIC}$ a média estimada foi de 1,33 g C mm⁻¹ ET ($bias = -0,24$ g C mm⁻¹ ET). Os valores obtidos de $WUE_{B.A.METRIC}$ foram bem próximos aos observados (MRE = 0,23% e RMSE = 0,54 g C mm⁻¹ ET) variando entre 0,76 g C mm⁻¹ ET e 2,25 g C mm⁻¹ ET, enquanto os reais ficaram entre 0,31 g C mm⁻¹ ET e 2,86 g C mm⁻¹ ET. Estes resultados mostram a qualidade da metodologia empregada para estimativa da $WUE_{B.A.METRIC}$, porém deve-se mencionar que houve uma perda de informação em algumas áreas devido à presença de valores negativos da LE que influenciaram na estimativa da FE.

Tabela 5.6 – Acurácia da WUE estimada no sítio experimental CTP.

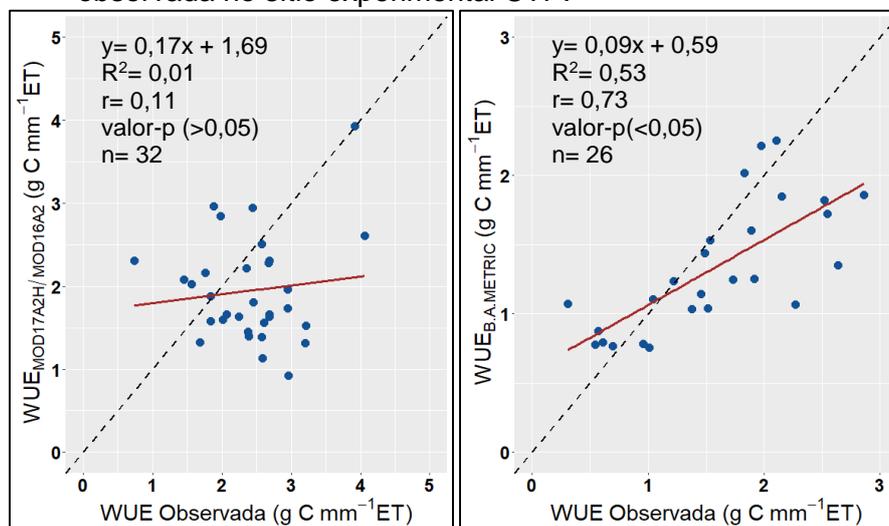
	MODIS	B.A.METRIC
Média Observada	2,42	1,57
Média Estimada	1,95	1,33
<i>bias</i>	-0,47	-0,24
RMSE	0,98	0,54
MRE (%)	-10,2	0,23
R ²	0,01	0,53
r	0,11*	0,73

RMSE é a raiz erro médio quadrático; MRE (%) é o erro relativo médio em percentagem; * indica p-value >0,05.

Fonte: Produção do autor.

Na Figura 5.11 observa-se que a WUE_{MODIS} não apresentou uma correlação linear com os dados de campo. A $WUE_{B.A.METRIC}$ apresentou um valor de $r=0,73$ muito alto conforme Hopkins (2000), e teve um $R^2=0,53$ para modelo de regressão gerado.

Figura 5.11 – Comparação entre a WUE estimada (B.A.METRIC e MODIS) e observada no sítio experimental CTP.

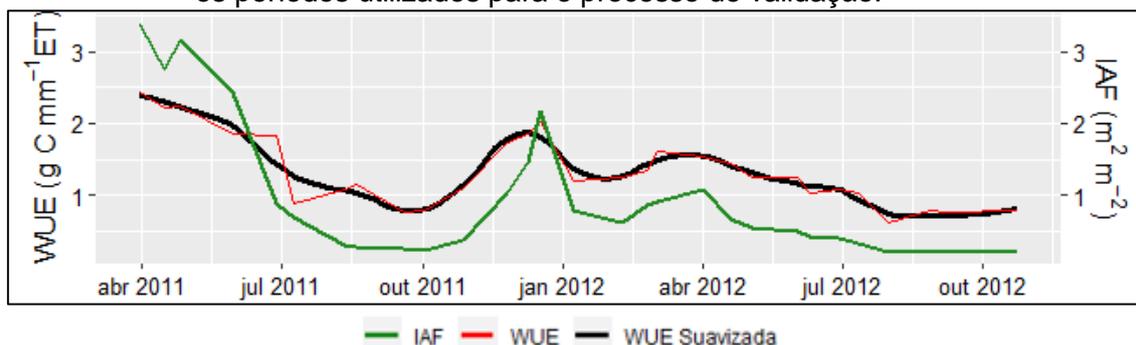


Fonte: Produção do autor.

De acordo com a Figura 5.12 os valores da WUE acompanharam o desenvolvimento da vegetação na área no sítio CTP. O valor médio da $WUE_{B.A.METRIC}$ no período chuvoso foi $1,74 \text{ g C mm}^{-1} \text{ ET}$, para o período seco o valor foi $1,06 \text{ g C mm}^{-1} \text{ ET}$. No período que a vegetação do sítio WUE apresentou os maiores valores de IAF (de março até maio de 2011) os valores

da WUE ficaram entre $1,82 \text{ g C mm}^{-1} \text{ ET}$ e $2,43 \text{ g C mm}^{-1} \text{ ET}$. Durante junho/2011 até outubro/2012, em que a região de Petrolina recebeu um acumulado de 201,2 mm de precipitação os valores da WUE variaram entre $0,20 \text{ g C mm}^{-1} \text{ ET}$ e $2,16 \text{ g C mm}^{-1} \text{ ET}$, apresentando um valor médio de $0,62 \text{ g C mm}^{-1} \text{ ET}$.

Figura 5.12 – Perfil temporal da $WUE_{B.A.METRIC}$ para o sítio experimental CTP durante os períodos utilizados para o processo de validação.



Fonte: Produção do autor.

5.3 Distribuição espacial da precipitação, temperatura de superfície, NDVI e albedo

Na Figura 5.13 observa-se que as médias mensais de precipitação variaram entre $2,28 \text{ mm mês}^{-1}$ ($\pm 0,44$) em setembro e $89,31 \text{ mm mês}^{-1}$ ($\pm 11,05$) em janeiro durante o período estudado. No meses entre novembro e abril (período chuvoso), os valores estiveram entre $9,15 \text{ mm mês}^{-1}$ e $131,09 \text{ mm mês}^{-1}$, com um valor médio de $51,73 \text{ mm mês}^{-1}$ ($\pm 5,78$). No período seco (maio – outubro) as médias mensais de precipitação ficaram entre $1,16 \text{ mm mês}^{-1}$ e $63,30 \text{ mm mês}^{-1}$, tendo um valor médio nesse período de $11,67 \text{ mm mês}^{-1}$ ($\pm 3,19$). Quando foram avaliados os acumulados médios mensais no período chuvoso, os maiores valores foram de $334,69 \text{ mm}$ ($\pm 31,05$), $331,57 \text{ mm}$ ($\pm 32,58$) e $284,88 \text{ mm}$ ($\pm 13,41$), respectivamente, nas bacias das Garças, Pontal e Curaçá, que nesta ordem compreendem cada 24%, 47% e 29% da área de estudo. No período seco foram $83,65 \text{ mm}$ ($\pm 8,59$), $56,18$ ($\pm 14,09$) e $71,60 \text{ mm}$ ($\pm 20,10$) respectivamente, nas bacias de Garças, Pontal e Curaçá.

Quanto a distribuição das médias mensais da LST na área de estudo (Figura 5.14) os maiores valores médios foram determinados para o período

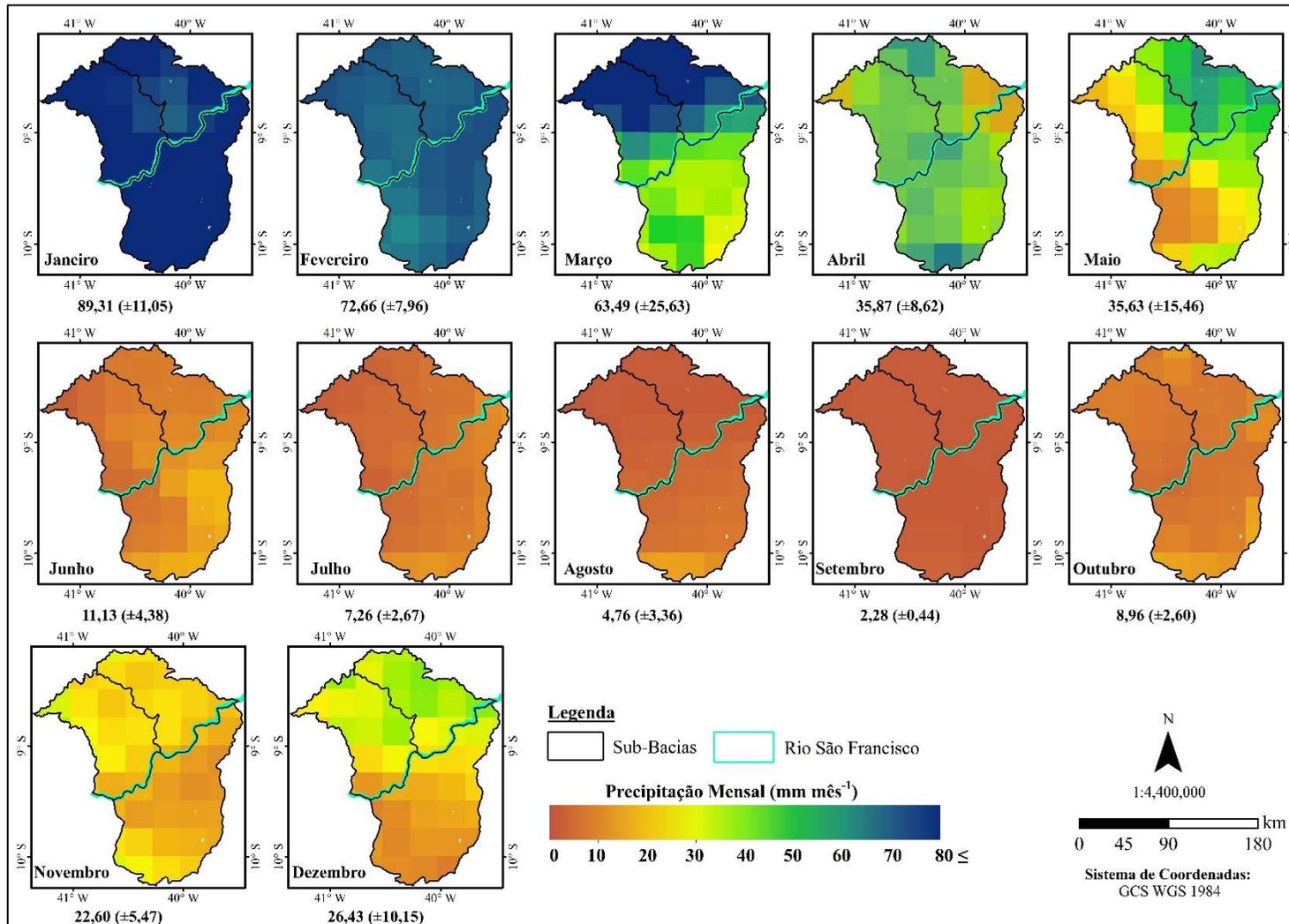
compreendido entre os meses de setembro e dezembro. Na área de estudo as médias da LST estiveram entre 31,55 °C ($\pm 1,55$) no mês de julho e 40,66 °C ($\pm 2,01$) em novembro. Observa-se que na área em destaque na Figura 5.14 que a região com forte concentração de agricultura irrigada durante o ano apresentou baixos valores de LST em comparação com as áreas adjacentes de não agricultura. Os valores médios de temperatura de superfície no período seco nas sub-bacias foram 34,07 °C ($\pm 1,10$) no Garças, 34,65 °C ($\pm 0,99$) no Pontal e 34,68 °C ($\pm 1,99$) no Curaçá. No período chuvoso foram 34,88 °C ($\pm 1,29$), 35,34 °C ($\pm 1,12$) e 36,57 °C ($\pm 2,19$), respectivamente, na Garças, Pontal e Curaçá. Nota-se no sul da área de estudo que devido à altitude uma pequena parte da bacia apresenta baixas temperatura de superfície durante todo o ano.

A Figura 5.15 mostra a distribuição espacial do NDVI mensal na área de estudo. Para as áreas irrigadas, que estão circuladas, em todo o ano foram observados altos valores de NDVI, já nas áreas de vegetação natural o NDVI acompanhou os eventos de precipitação. Os menores valores de NDVI foram encontrados em novembro, enquanto já os maiores valores foram observados no mês de março. O NDVI médio no período seco foi de 0,31 ($\pm 0,07$), variando entre 0,08 e 0,75; enquanto na época chuvosa estes encontraram-se entre 0,08 e 0,74, com uma média de 0,41 ($\pm 0,08$). Quando analisou-se o NDVI por sub-bacia, nota-se que os maiores valores foram encontrados, tanto no período seco quanto no chuvoso, na bacia das Garças o que pode ser explicado devido ao fato de ser uma região que recebeu maiores valores de precipitação durante o ano. No período chuvoso os NDVI médios nas sub-bacias das Garças, Pontal e Curaçá foram respectivamente 0,45 ($\pm 0,06$), 0,43 ($\pm 0,07$) e 0,37 ($\pm 0,08$); enquanto para o seco 0,34 ($\pm 0,05$), 0,31 ($\pm 0,06$) e 0,30 ($\pm 0,07$). Observou-se que o NDVI nas áreas de Caatinga variaram de 0,08 e 0,83, com um valor médio no período chuvoso de 0,42 ($\pm 0,07$) e no seco 0,32 ($\pm 0,06$). Nas áreas de Caatinga os maiores valores foram encontrados em março, que é um mês chuvoso. As áreas de agricultura apresentaram NDVI variando entre 0,06 e 0,80, apresentando valores médios de 0,47 ($\pm 0,09$) e 0,43 ($\pm 0,10$) nos períodos chuvoso e seco, respectivamente. Os menores valores foram

encontrados nas áreas de pastagem, os quais ficaram entre 0,11 e 0,75 com médias de 0,38 ($\pm 0,05$) e 0,28 ($\pm 0,04$) nos períodos chuvoso e seco respectivamente. Nota-se que as regiões de pastagem apresentaram uma menor amplitude nos dados de NDVI do que as áreas de agricultura e Caatinga.

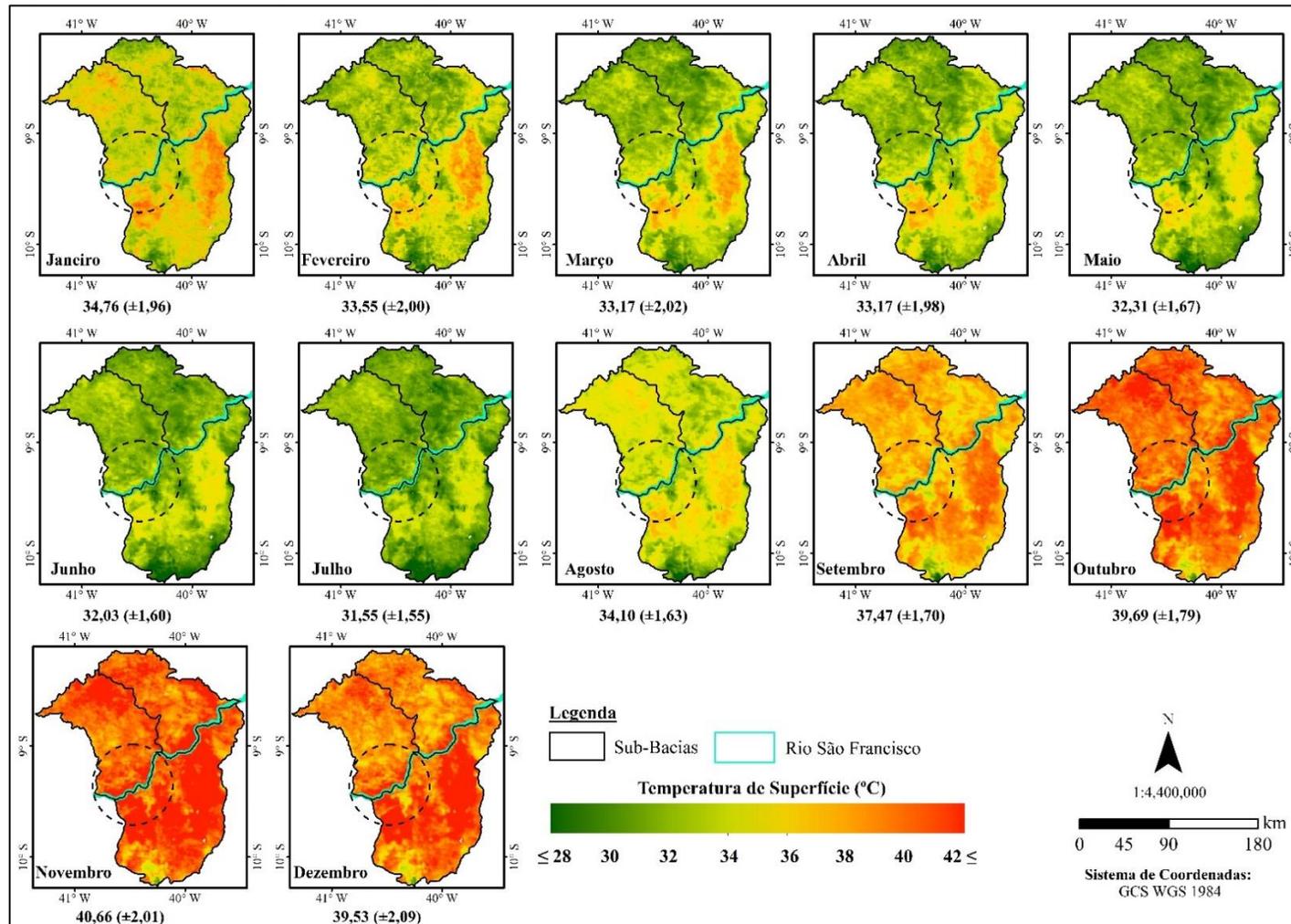
Com relação à variável albedo na área de estudo (Figura 5.16), observa-se que houve pouca variação ao longo dos meses, com um albedo médio mensal de $\sim 0,15$ ($\pm 0,02$), observando-se o mesmo valor tanto no período seco quanto no chuvoso. A partir da análise da Figura 5.16 nota-se que os valores de albedo caíram no período chuvoso em decorrência do desenvolvimento de vegetação e da maior umidade nos solos, porém o mesmo aumentou com o início do período seco, notando-se ainda uma diminuição de seus valores em algumas áreas por volta do mês de novembro. Nas áreas de agricultura os valores de albedo variaram entre 0,07 e 0,22 ao longo do ano, apresentando uma média de 0,16 nos períodos chuvoso e seco. O albedo médio para as áreas de agricultura enquadrou-se nos limiares encontrados por Silva et al. (2016), que num perímetro irrigado situado no semiárido brasileiro encontraram valores de albedo entre 0,16 e 0,18 nas áreas de cultivo. Durante o ano o albedo nas áreas de Caatinga variou entre 0,06 e 0,22 com uma média de 0,14 tanto no período seco quanto no chuvoso. O albedo médio nas áreas de Caatinga na região estudada foi similar ao albedo médio obtido por Teixeira et al. (2008), que obtiveram o valor de 0,14 para uma área de Caatinga utilizando medições em superfície. Nas áreas de pastagem o albedo esteve entre 0,10 e 0,22, apresentando uma média de 0,16, valor parecido aos encontrados por Liberato (2011) para uma área de pastagem na região amazônica que variou entre 0,16 e 0,2.

Figura 5.13 – Médias mensais de precipitação considerando os anos de 2011, 2012, 2015 e 2016.



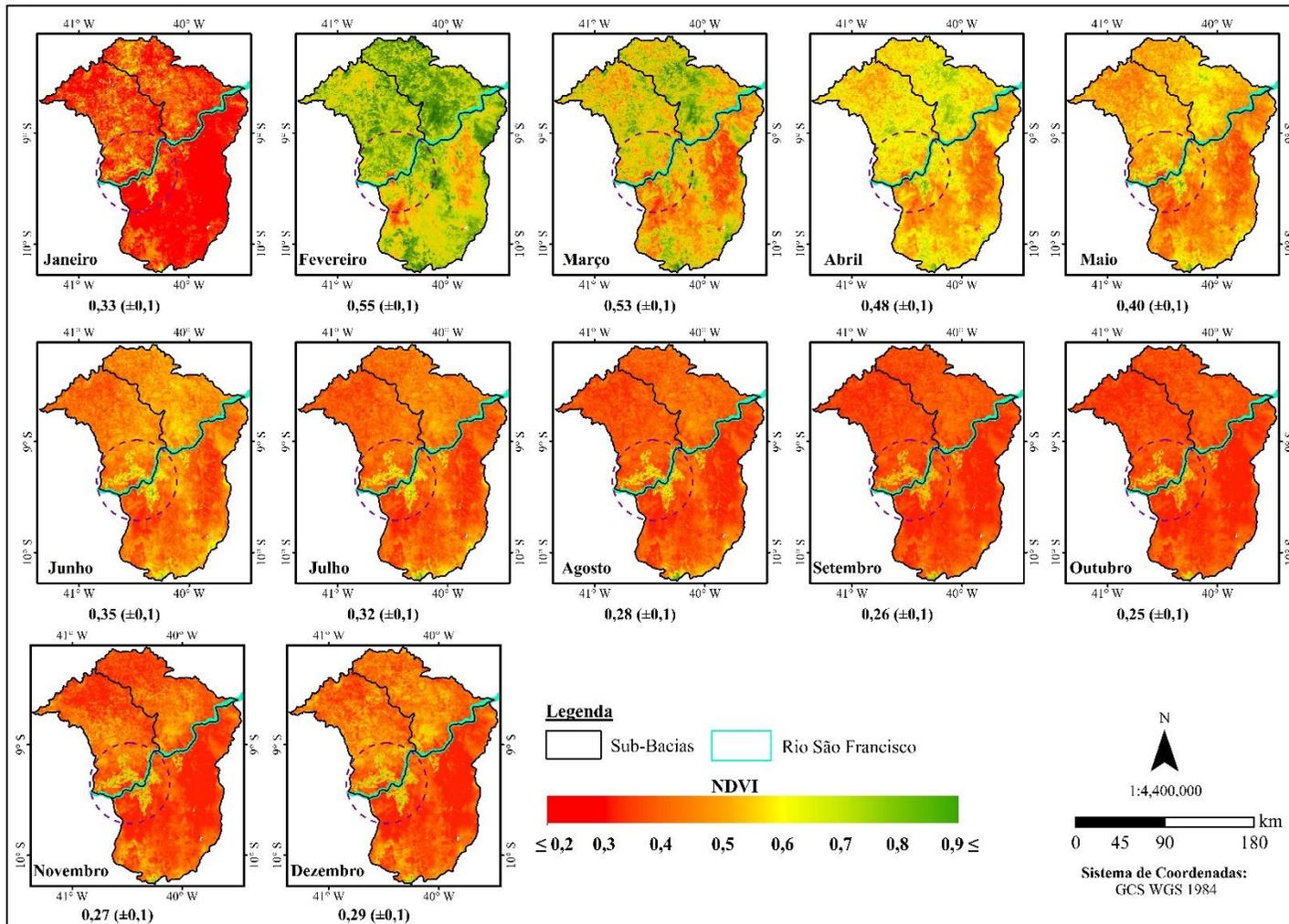
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.14 – Médias mensais da temperatura de superfície considerando os anos de 2011, 2012, 2015 e 2016. A área em destaque apresenta uma forte agricultura irrigada.



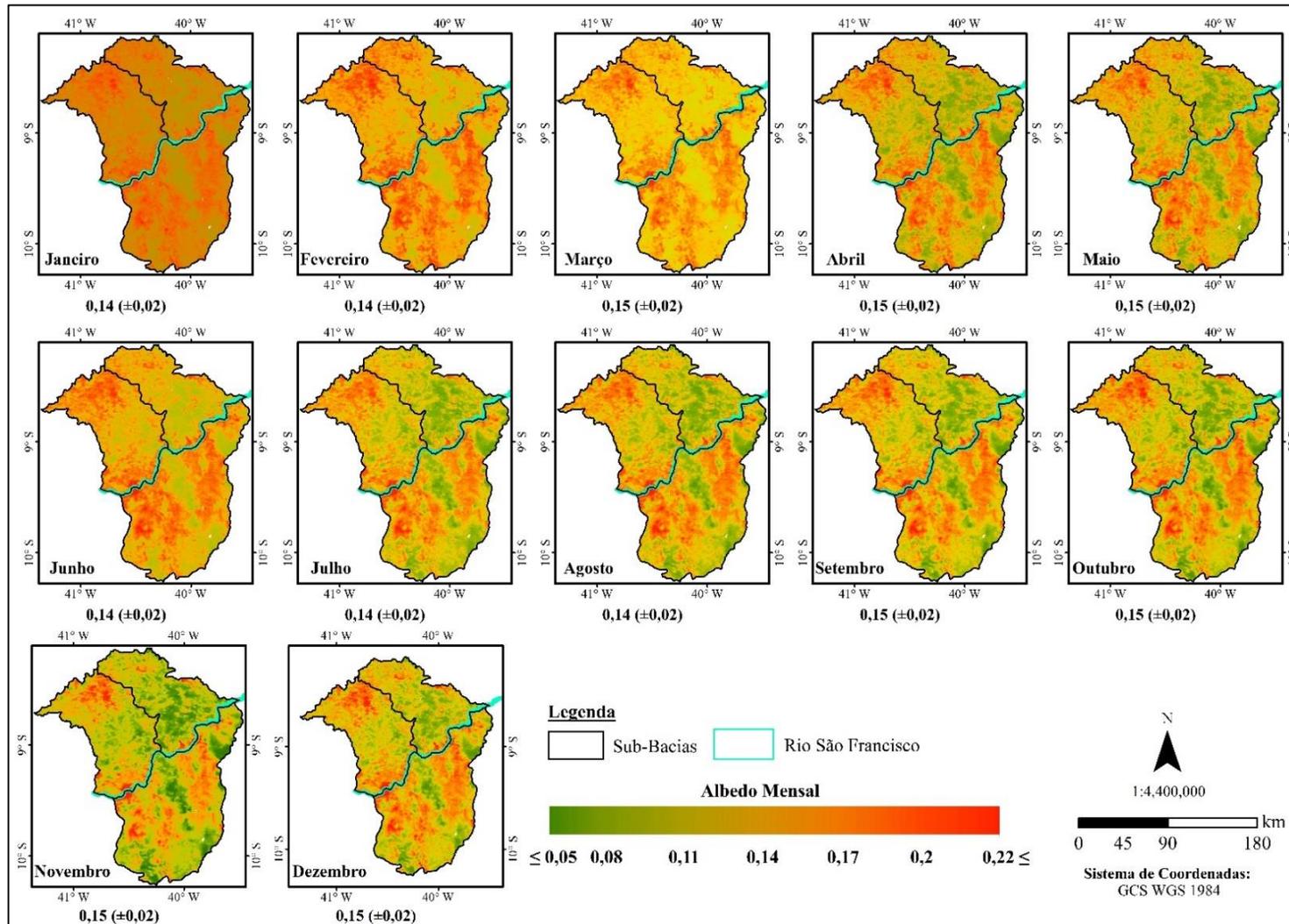
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.15 – Médias mensais de NDVI considerando os anos de 2011, 2012, 2015 e 2016. A área em destaque apresenta uma forte agricultura irrigada.



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.16 – Médias mensais de albedo considerando os anos de 2011, 2012, 2015 e 2016.



Fonte: Produção do autor.

5.4 Distribuição espacial dos fluxos de carbono e água

A Figura 5.17 mostra que durante o período estudado a ET_a média na área de estudo foi $4,35 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 1,09$), variando conforme os meses do ano e apresentando os maiores valores durante o período chuvoso (novembro - abril). Nota-se ainda que os maiores valores da ET_a foram encontrados no mês de fevereiro, apresentando uma média de $8,64 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 1,61$). A ET_a média no período chuvoso para as sub-bacias analisadas foram: Garças – $6,03 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 0,97$), Pontal – $5,75 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 0,92$), Curaçá – $4,81 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 1,36$). Para o período seco os maiores valores médios da ET_a para as sub-bacias foram $3,91 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 0,97$) – Garças, $3,35 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 1,52$) – Curaçá e $3,01 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 0,77$) – Pontal. Quando analisa-se os tipos de cobertura da terra (agricultura, Caatinga e pastagem) na região estudada com relação ao regime de chuvas, nota-se que as áreas de pastagem (que de acordo com a Tabela 3.1 abrangem ~12% da região estudada desconsiderando o mosaico agricultura+pastagem e corpos d'água) mostraram os menores valores médios de ET_a durante o período estudado: $5,23 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 1,12$) na época das chuvas e $3,21 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 1,14$) para o período seco. Para as áreas agricultura a ET_a média no período chuvoso ficou em torno de $5,39 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 1,09$) e no seco próximo a $3,54 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 1,46$). Deve-se ressaltar que nestes valores estão inclusos todas as áreas irrigadas e não irrigadas da região e conforme a Tabela 3.1 a classe agricultura abrange ~5% da região de estudo, já o mosaico agricultura e pastagem 17%. Nas áreas de Caatinga, que totalizam ~66% da área de estudo, obteve-se uma ET_a média de $5,49 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 1,26$) na época chuvosa e $3,47 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 1,26$) no período seco.

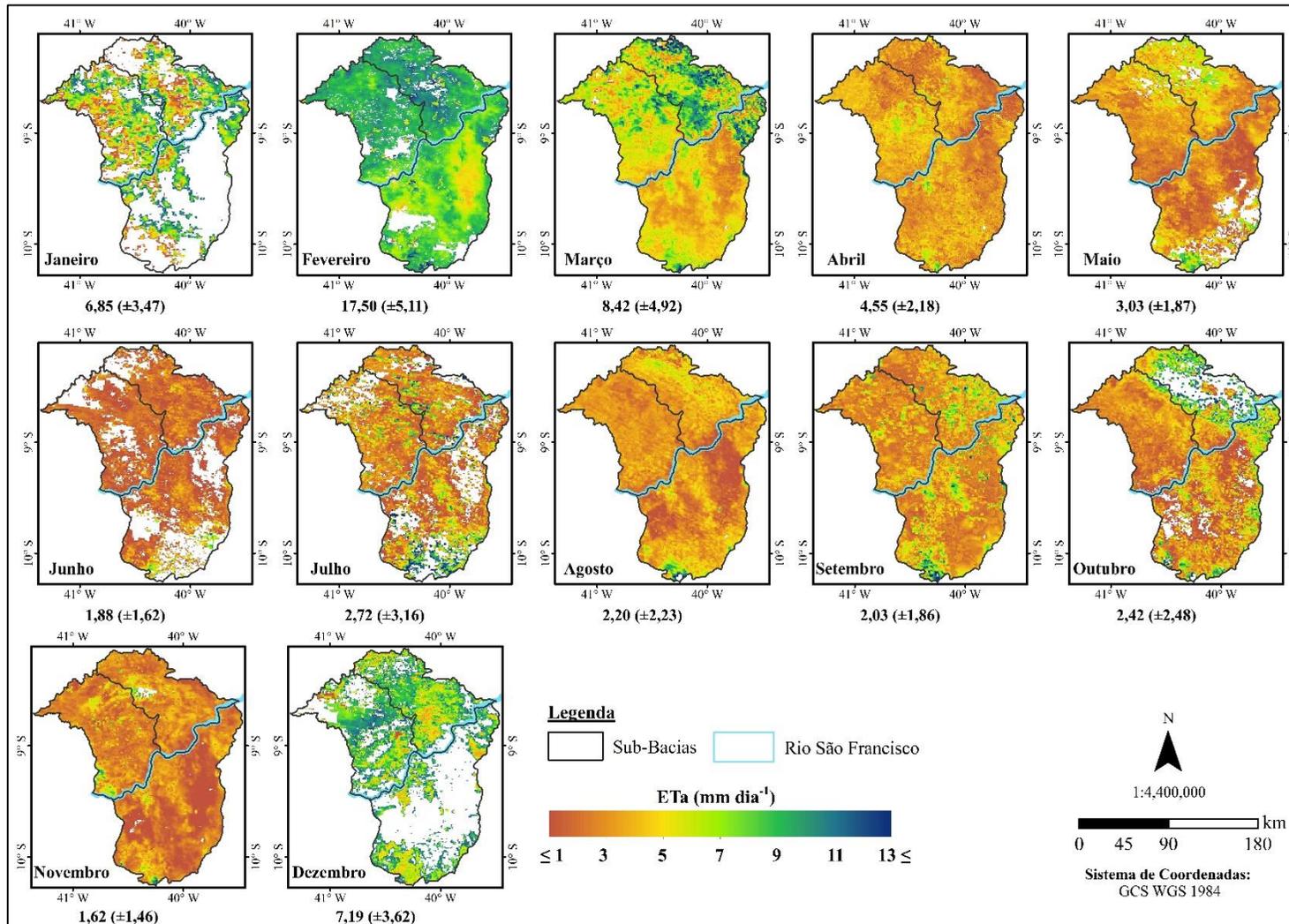
Conforme mostrado na Figura 5.18 o aumento dos valores da GPP na maior parte da área de estudo é dependente das chuvas da região. A área circulada que apresenta uma forte agricultura irrigada durante o período seco os valores da GPP se diferenciam das áreas de vegetação natural, criando praticamente uma máscara de agricultura irrigada. Durante o período chuvoso na sub-bacia das Garças a GPP variou entre $\sim 0 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $36,56 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, apresentando uma média de $8,50 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($\pm 1,96$). Já na sub-bacia do

Pontal os valores da GPP variaram entre ~ 0 g C m⁻² dia⁻¹ e 32,62 g C m⁻² dia⁻¹, com uma média de 7,55 g C m⁻² dia⁻¹ ($\pm 1,92$); e na área de Curaçá a média da GPP foi de 6,25 g C m⁻² dia⁻¹ ($\pm 2,28$), estando os valores entre ~ 0 g C m⁻² dia⁻¹ e 34,08 g C m⁻² dia⁻¹. Como visto na Figura 5.18 mesmo a bacia do Curaçá apresentando os maiores valores de GPP, nota-se que no geral na grande maioria da sub-bacia os valores são mais baixos que na das Garças. Quanto a GPP no período chuvoso para sub-bacia das Garças nos diferentes tipos de cobertura da terra na área, observou-se que os maiores valores médios foram 8,08 g C m⁻² dia⁻¹ ($\pm 2,33$), 7,55 g C m⁻² dia⁻¹ ($\pm 2,25$) e 6,50 g C m⁻² dia⁻¹ ($\pm 1,79$), respectivamente, para as áreas de agricultura, Caatinga e pastagem. No período seco a GPP média para a sub-bacia das Garças foi de 2,78 g C m⁻² dia⁻¹ ($\pm 1,09$) com valores entre ~ 0 g C m⁻² dia⁻¹ e 27,82 g C m⁻² dia⁻¹; na bacia do Pontal os valores médios da GPP estavam entre ~ 0 g C m⁻² dia⁻¹ e 23,41 g C m⁻² dia⁻¹, com GPP média de 2,01 g C m⁻² dia⁻¹ ($\pm 0,95$); e na bacia do Curaçá a GPP média foi de 2,27 g C m⁻² dia⁻¹ ($\pm 2,02$), com valores entre ~ 0 g C m⁻² dia⁻¹ e 35,75 g C m⁻² dia⁻¹. Observa-se que durante a época seca a sub-bacia das Garças apresentou os maiores valores da GPP, seguida pela do Curaçá. No período seco os maiores valores da GPP foram encontrados nas áreas de agricultura, que apresentaram um valor médio de 4,19 g C m⁻² dia⁻¹ ($\pm 2,11$) que abrangem $\sim 5\%$ da área de estudo (não levando em consideração o mosaico de agricultura e pastagem), estas se destacam por serem irrigadas e podem continuar seu crescimento vegetativo mesmo fora da época das chuvas. No entanto as áreas de Caatinga (66% da região de estudo) apresentaram uma GPP média de 2,45 g C m⁻² dia⁻¹ ($\pm 2,11$) e nas áreas de pastagem (não levando em consideração o mosaico agricultura e pastagem) que correspondem a $\sim 12\%$ da região de estudo 1,81 g C m⁻² dia⁻¹ ($\pm 2,11$).

Analisando-se a distribuição espacial da WUE por meio da Figura 5.19, nota-se que durante todo o anos as áreas de agricultura irrigada apresentam altos valores de WUE, como é mostrado na área circulada e o extremo sul da região de estudo que é mais úmido. A WUE média variou entre 0,53 g C mm⁻¹ ET ($\pm 0,25$) no mês de setembro até 1,98 g C mm⁻¹ ET ($\pm 0,33$) em fevereiro na área de estudo. Tanto no período chuvoso quanto no seco, os maiores valores

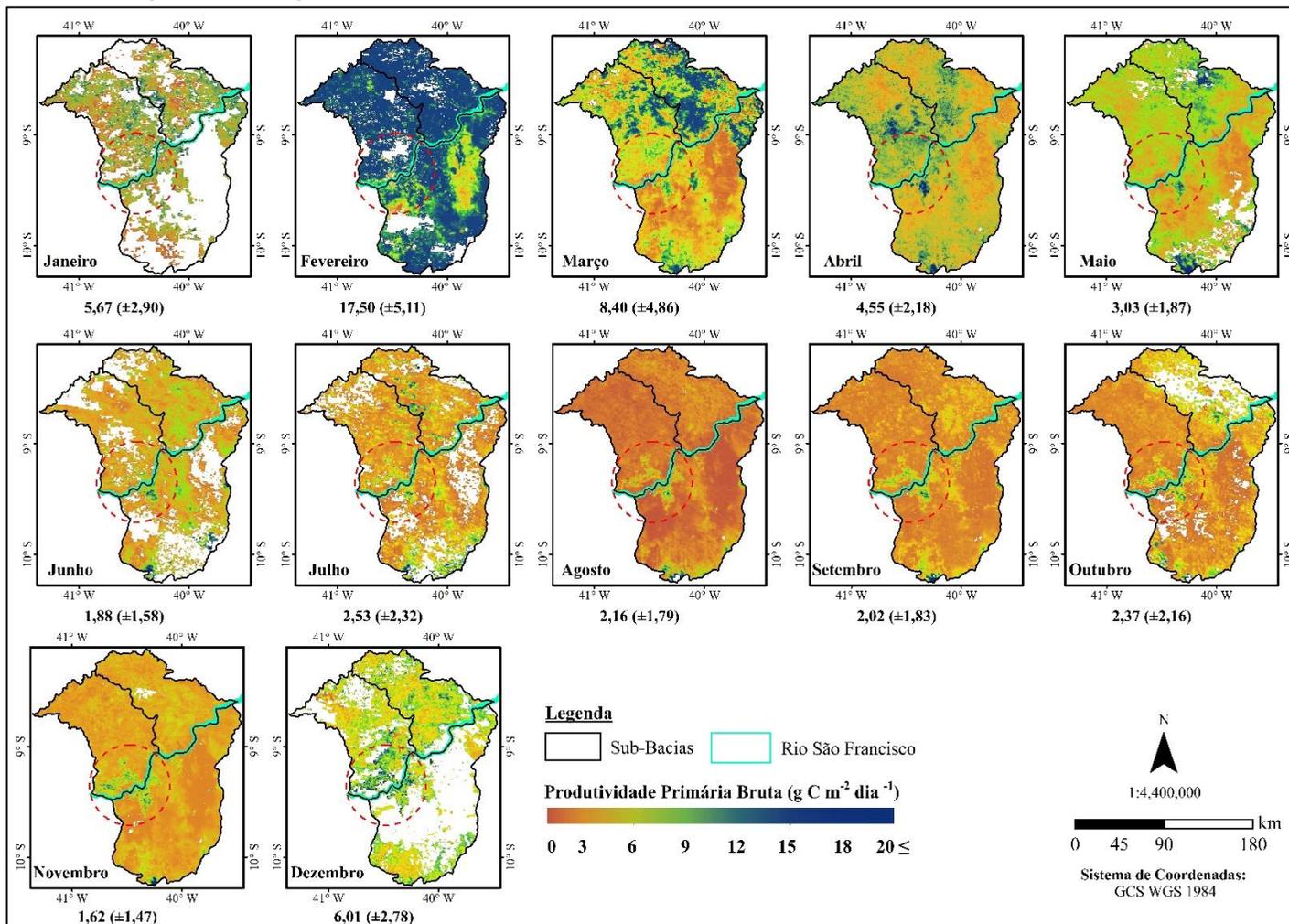
médios da WUE foram encontrados em ordem decrescente nas sub-bacias das Garças, Pontal e Curaçá. Na bacia das Garças na época das chuvas os valores da WUE variaram entre ~ 0 g C mm⁻¹ ET e 2,76 g C mm⁻¹ ET, com uma média de 1,26 g C mm⁻¹ ET ($\pm 0,19$). Ainda no período chuvoso a bacia do Pontal apresentou valores de WUE entre ~ 0 g C mm⁻¹ ET e 2,89 g C mm⁻¹ ET, e média de 1,19 g C mm⁻¹ ET ($\pm 0,24$); a bacia do Curaçá possui uma WUE média de 1,13 g C mm⁻¹ ET ($\pm 0,24$), variando entre ~ 0 g C mm⁻¹ ET e 2,85 g C mm⁻¹ ET. Quando avaliou-se as áreas de Caatinga, pastagem e agricultura na região de estudo, a WUE média no período chuvoso foi de 1,21 g C mm⁻¹ ET ($\pm 0,20$), 1,46 g C mm⁻¹ ET ($\pm 0,37$), 1,08 g C mm⁻¹ ET ($\pm 0,18$), respectivamente, para as áreas de Caatinga, agricultura e pastagem. Observa-se que os valores médios de WUE para cada sub-bacia dependem fortemente do percentual de variação de uso da terra, uma vez que $\sim 71\%$ das áreas das sub-bacias das Garças e Pontal é de Caatinga, sendo maior que Curaçá que possui apenas $\sim 55\%$ da área de vegetação da Caatinga, porém Garças e Pontal apresentam uma área menor de pastagem que equivalem $\sim 11\%$ e $\sim 8\%$ respectivamente. Quando analisa-se o período seco (maio – outubro) do ano, os valores da WUE diminuíram, porém observa-se na Figura 5.19 que a sub-bacia das Garças apresentou valores ligeiramente maiores que as outras sub-bacias. Quando observa-se os números, no período seco na sub-bacia das Garças os valores ficaram entre 0,02 g C mm⁻¹ ET e 2,35 g C mm⁻¹ ET, com uma média de 0,74 g C mm⁻¹ ET ($\pm 0,18$); o Pontal a média foi de 0,69 g C mm⁻¹ ET ($\pm 0,27$) e os valores da WUE estiveram entre 0,01 g C mm⁻¹ ET e 2,62 g C mm⁻¹ ET. A sub-bacia do Curaçá apresentou uma média de 0,65 g C mm⁻¹ ($\pm 0,28$), ou seja, essa sub-bacia apresentou o menor valor entre as áreas estudadas. No Curaçá os valores da WUE ficaram entre ~ 0 g C mm⁻¹ ET e 2,83 g C mm⁻¹ ET. Quanto a cobertura da terra na época seca as médias foram, respectivamente, para as classes Caatinga, agricultura e pastagem, 0,70 g C mm⁻¹ ($\pm 0,20$), 1,25 g C mm⁻¹ ($\pm 0,43$), 0,56 g C mm⁻¹ ($\pm 0,16$). Nota-se que o tipo de cobertura Caatinga mesmo apresentando uma vegetação totalmente dependente das chuvas que acontecem na região, os valores médios obtidos foram próximos aos de agricultura.

Figura 5.17 – Médias mensais para ET_a considerando os anos de 2011, 2012, 2015 e 2016.



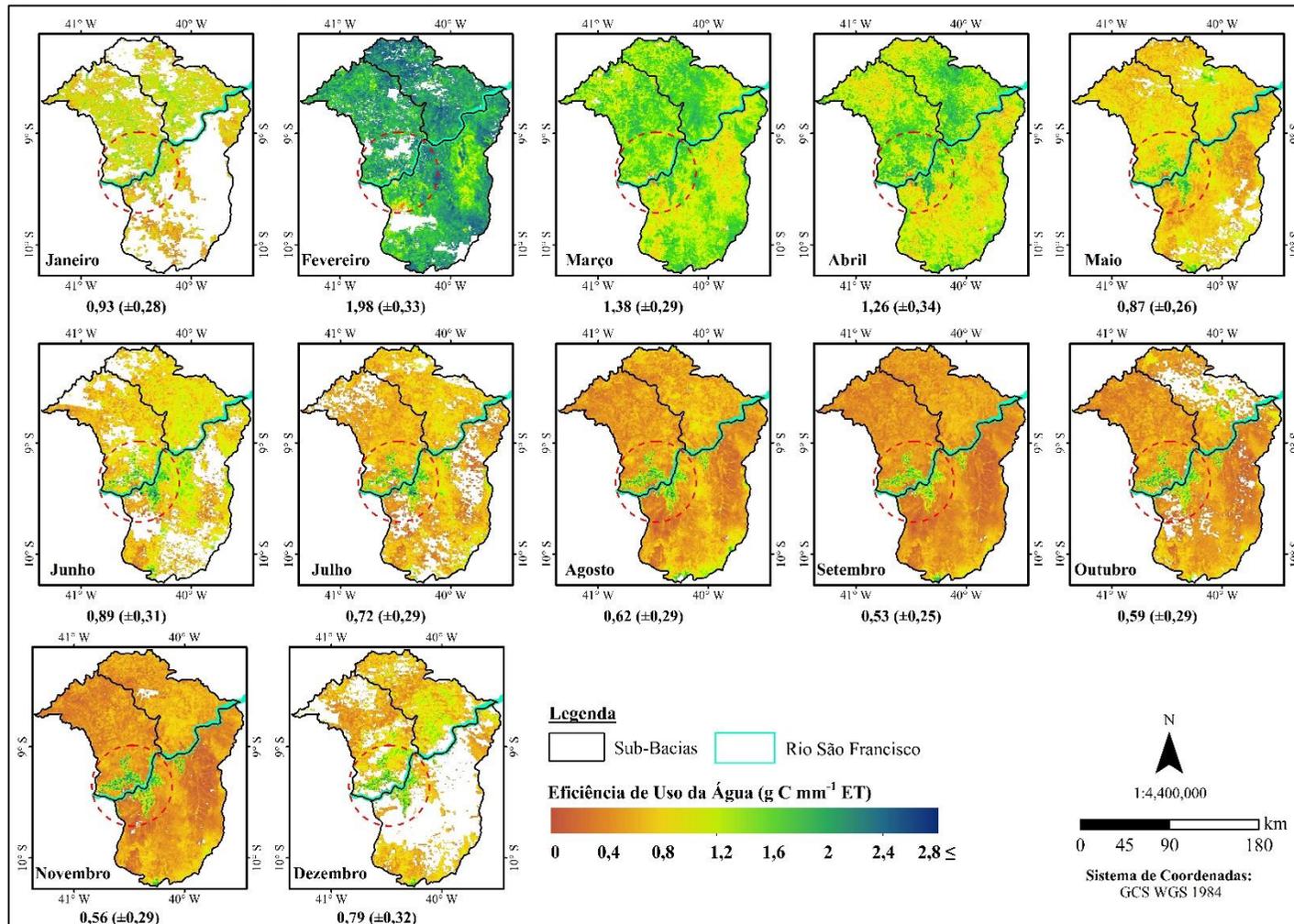
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.18 – Médias mensais para GPP_{B.A.} diária considerando os anos de 2011, 2012, 2015 e 2016. A área em destaque apresenta uma forte agricultura irrigada.



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.19 – Médias mensais para $WUE_{B.A.METRIC}$ diária considerando os anos de 2011, 2012, 2015 e 2016. A área em destaque apresenta uma forte agricultura irrigada.

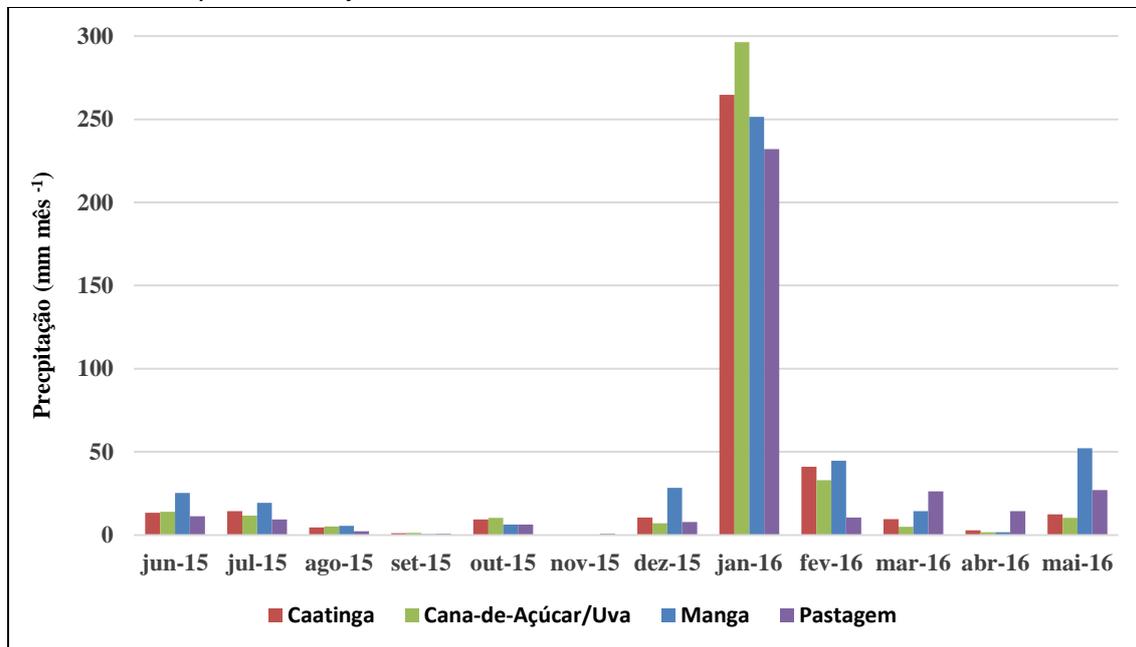


Fonte: Produção do autor.

5.5 Comportamento dos fluxos de água e carbono em diferentes tipos de uso e cobertura da terra

Este capítulo aborda os resultados relacionados ao comportamento dos fluxos de água e carbono durante o período de junho/2015 à maio/2016 para as coberturas mapeadas. Conforme apresentado na Figura 5.20 nas áreas mapeadas, durante sete meses (junho/2015 até dezembro/2015) choveu um total de 53,13 mm (Caatinga), 49,10 mm (cana-de-açúcar e uva), 38,45 mm (pastagem) e 85,25 mm (manga), enquanto que em janeiro de 2016 estas áreas receberam uma precipitação média de 268,26 mm ($\pm 28,24$) ou seja, a precipitação foi superior em aproximadamente 5,1; 5,5 e 7,0 vezes, respectivamente. Conforme a análise da Figura 5.20 os totais de precipitação durante o período analisado foram de 383,63 mm (Caatinga), 395,34 mm (cana-de-açúcar e uva), 348,77 mm (pastagem) e 449,41 mm (manga).

Figura 5.20 – Média zonal da precipitação acumulada mensal em cada uso e cobertura da terra mapeado proveniente do produto 3B43 do TRMM para o período de junho/2015 até maio/2016.

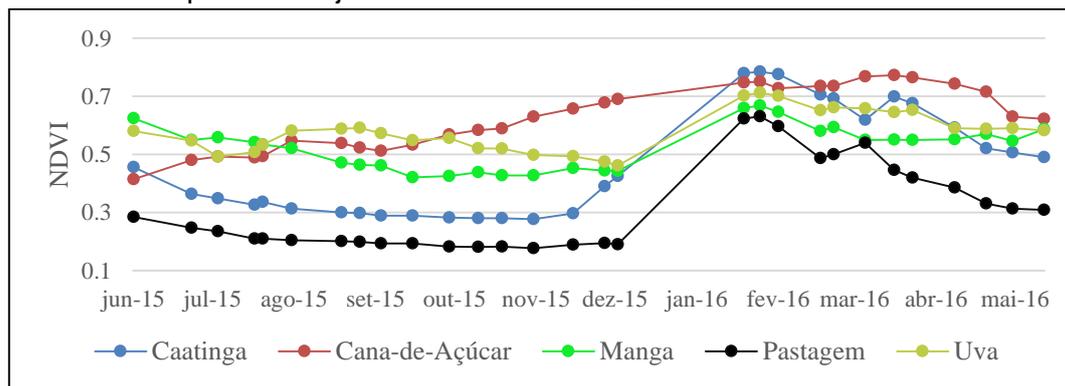


Fonte: Produção do autor.

Conforme a Figura 5.21 as coberturas não irrigadas (pastagem e Caatinga) apresentaram os menores valores de NDVI nos 7 meses iniciais o que mostra a dependência destas ao regime de chuvas da região, no entanto as outras

culturas que eram irrigadas tiveram altos valores de NDVI durante todo o período avaliado. A Tabela 5.7 mostra os resultados da comparação entre os perfis temporais de NDVI pelo teste de Mann-Whitney, de acordo com a tabela não houve diferenças (à 5%) entre os usos cana-de-açúcar/uva e uva/manga, porém cada classe será explicada separadamente.

Figura 5.21 – Média zonal do NDVI para cada uso e cobertura da terra mapeado para o período de junho/2015 até maio/2016.



Fonte: Produção do autor.

Na área de Caatinga os valores de NDVI variaram entre 0,28 e 0,79, apresentando uma média de 0,46 (\pm 0,18). Após as fortes chuvas de janeiro o NDVI da área passou de em média 0,33 para 0,78, mostrando que a vegetação respondeu rapidamente às chuvas, estando em boas condições e em forte atividade fotossintética. Observa-se na Figura 5.21 que a vegetação da Caatinga conseguiu se manter em plena atividade apresentando NDVI durante toda a quadra chuvosa (janeiro – abril) atingindo um NDVI um pico de 0,79. Quanto ao perfil temporal do NDVI para área de cana-de-açúcar os valores estiveram entre 0,41 e 0,77, com uma média de 0,63 (\pm 0,11). O pico do NDVI na área de cana-de-açúcar foi observado no final do mês de março e se manteve até o início de abril, quando a partir desta data este índice começou a cair, possivelmente devido ao processo de maturação da cultura. Na área de manga o NDVI médio foi 0,53 (\pm 0,08), variando entre 0,42 e 0,67. Nota-se na Figura 5.21 que durante os meses de novembro – janeiro no cultivo da manga houve um aumento dos valores de NDVI o qual coincide com o período do crescimento vegetativo da cultura no campo. O período que vai de julho/2015 até outubro/2015 na área de manga, compreende respectivamente final da

frutificação, crescimento e maturação dos frutos, e a colheita. Cabe destacar que o cultivo da manga passa por diferentes tratamentos culturais neste período, como por exemplo a desfolha da mangueira que é praticada quando a folhagem é abundante, para que aumente a capacidade produtiva da planta e a coloração dos frutos, sendo recomendada ser realizada próxima do final da fase da maturação fazendo com que perdendo suas folhas os valores de NDVI diminuam (EMBRAPA SEMIÁRIDO, 2015). O perfil temporal de NDVI para o cultivo da uva apresentou uma média de 0,58 ($\pm 0,07$), tendo valores entre 0,46 e 0,71. Na videira os menores valores foram encontrados no mês de dezembro/2015 e os maiores em fevereiro/2016, os menores valores de NDVI podem ser devido ao período da brotação e os maiores indicam o máximo crescimento vegetativo em campo da planta. A área de Caatinga e a de pastagem dependem da água das chuvas para os seus desenvolvimentos, enquanto as outras coberturas aqui tratadas não, pois são cultura irrigadas. Esta influência da disponibilidade de água pode ser percebida na Figura 5.21, onde percebe-se que os menores valores de NDVI são encontrados nas áreas de Caatinga e pastagem, os quais variaram de 0,18 e 0,63 apresentando um valor médio de 0,31 ($\pm 0,15$). Nos sete meses que antecederam as chuvas de janeiro/2016 o NDVI médio foi de 0,20, após o ocorrido estes subiram para 0,62 mantendo-se próximo a 0,60 até o início da primeira quinzena de fevereiro/2016.

A Tabela 5.7 mostra que as coberturas mapeadas se diferenciaram para as variáveis ET_a e $GPP_{B.A.}$ segundo o teste de Mann-Whitney (5%). Quando avaliou-se a WUE, as classes cana-de-açúcar, manga e uva não se diferenciaram, por isso foi criada a classe Agricultura Irrigada que representa a junção das amostras dos 3 perfis. Conforme mencionado no parágrafo de NDVI, não houve diferenças entre as classes cana-de-açúcar/uva e manga/uva.

Tabela 5.7 – Resultado do teste não paramétrico de Mann-Whitney (peso significativo a 5%) para os perfis temporais de ET_a , $GPP_{B.A.}$, $WUE_{B.A.METRIC}$ e NDVI para o período de junho/2015 e maio/2016. A letra D significa diferentes (valor-p < 0,05) e a letra I significa iguais (valor-p > 0,05).

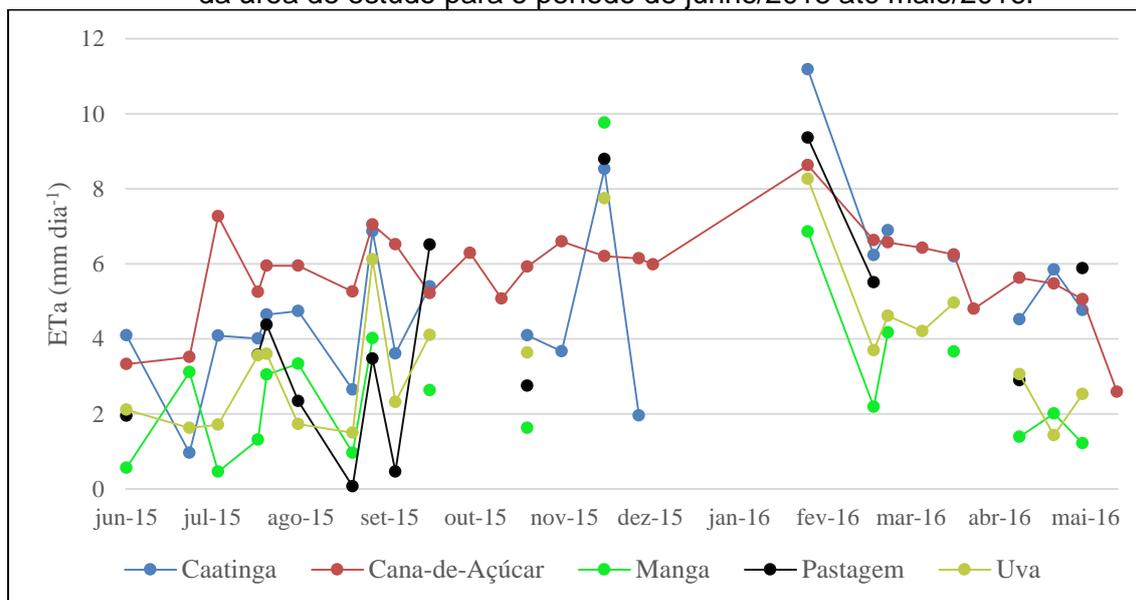
	ET_a	GPP	WUE	NDVI
Cana-de-Açúcar x Caatinga	D	D	D	D
Cana-de-Açúcar x Uva	D	D	I	I
Cana-de-Açúcar x Manga	D	D	I	D
Caatinga x Uva	D	D	D	D
Caatinga x Manga	D	D	D	D
Uva x Manga	D	D	I	I
Pastagem x Cana-de-Açúcar	D	D	D	D
Pastagem x Caatinga	D	D	D	D
Pastagem x Uva	D	D	D	D
Pastagem x Manga	D	D	D	D

Fonte: Produção do autor.

As médias zonais da ET_a na coberturas da terra mapeadas (Figura 5.22) variaram ao longo do experimento, na área de Caatinga a ET_a média durante o período avaliado foi de $5,0 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 2,24$). No período chuvoso a ET_a na Caatinga foi de $5,92 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 2,78$), atingindo seu pico no mês de fevereiro com $11,19 \text{ mm dia}^{-1}$. Para o período seco a média foi de $4,31 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 1,52$). Estes valores foram diferentes daqueles encontrados por Carvalho et al. (2018), que obtiveram valores de ET_a entre $0,9 \text{ mm dia}^{-1}$ e $3,1 \text{ mm dia}^{-1}$ para uma área de Caatinga que abrangia parte da área mapeada neste estudo e para o mesmo período de tempo, e utilizava os dados provenientes de uma torre micrometeorológica. Essas diferenças podem ser explicadas pelo fato de que na etapa de seleção dos *pixels* quente e frio, mesmo esta sendo feita da melhor forma possível, no período chuvoso algumas áreas de vegetação natural superestimavam a ET_a . Da mesma forma que a área de Caatinga a ET_a na classe de pastagem acompanhou as chuvas que aconteceram no sítio. Na classe pastagem os valores estiveram entre $0,07 \text{ mm dia}^{-1}$ e $9,37 \text{ mm dia}^{-1}$, com uma média de $3,92 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 2,95$). A ET_a média na pastagem foi próxima a obtida por Pôças et al. (2013) de $2,76 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 0,32$) numa área de pastagem no extremo norte de Portugal. No período chuvoso a ET_a ficou em torno de $5,87 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 3,14$) e no período seco a ET_a foi de aproximadamente $2,54 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 2,00$).

Quanto aos cultivos irrigados estes acompanharam o desenvolvimento das culturas no campo. Na área de cana-de-açúcar a ET_a ficou entre $2,59 \text{ mm dia}^{-1}$ e $8,63 \text{ mm dia}^{-1}$, com média de $5,76 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 1,24$). A ET_a média foi bem próxima as encontradas por Carvalho et al. (2018) e Silva et al. (2012) na mesma Usina que foram $4,7 \text{ mm dia}^{-1}$ e $5,57 \text{ mm dia}^{-1}$, provenientes de dados de torre micrometeorológica. A ET_a pouco se diferenciou nos períodos seco (maio – outubro) e chuvoso (novembro – abril) apresentando valores de $5,32 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 1,33$) e $6,32 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 0,89$) respectivamente. O valor máximo da ET_a ocorreu no mês de fevereiro, após isso a mesma começou a cair devido à suspensão da irrigação em campo. Na área de manga os valores máximos da ET_a ocorreram entre os meses de dezembro e fevereiro, durante todo o período avaliado a ET_a média foi de $2,91 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 2,33$), variando entre $0,46 \text{ mm dia}^{-1}$ e $9,76 \text{ mm dia}^{-1}$. A queda na ET_a na área de manga pode ser devido à etapa de redução da lâmina de irrigação na cultura que antecede a floração (REIS et al., 2011). Quando se analisa as médias da ET_a nos períodos chuvoso e seco, esta foi $4,24 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 3,08$) e $2,06 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 1,23$) respectivamente. Comparando os dados estimados para área de manga, estes valores foram próximos aos encontrados por Teixeira et al. (2008a) que obtiveram em duas safras avaliadas uma ET_a média de $3,83 \text{ mm dia}^{-1}$ e $3,64 \text{ mm dia}^{-1}$, para uma área comercial de *Tommy Atkins* (mesma cultivar da área avaliada) na região nordeste do Brasil. Em um cultivo comercial de manga *Tommy Atkins* na região semiárida de Azevedo et al. (2003) obtiveram uma ET_a média de $4,4 \text{ mm dia}^{-1}$ entre o período da floração e maturação dos frutos. Na área de uva de mesa os valores estiveram entre $1,43 \text{ mm dia}^{-1}$ e $8,27 \text{ mm dia}^{-1}$, apresentando uma ET_a média de $3,63 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 1,98$). A ET_a média para uva de mesa foi próxima daquela obtida por Teixeira et al., (2007), cujos valores foram de $4,4 \text{ mm dia}^{-1}$ e $3,9 \text{ mm dia}^{-1}$ para os anos de 2002 e 2003, respectivamente, sendo utilizado a metodologia da razão de Bowen na mesma área da classe. No período seco e chuvoso a ET_a média foi de $2,70 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 1,41$) e $5,03 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\pm 1,94$) respectivamente.

Figura 5.22 – Média zonal da ET_a para os principais tipos de uso e cobertura da terra da área de estudo para o período de junho/2015 até maio/2016.



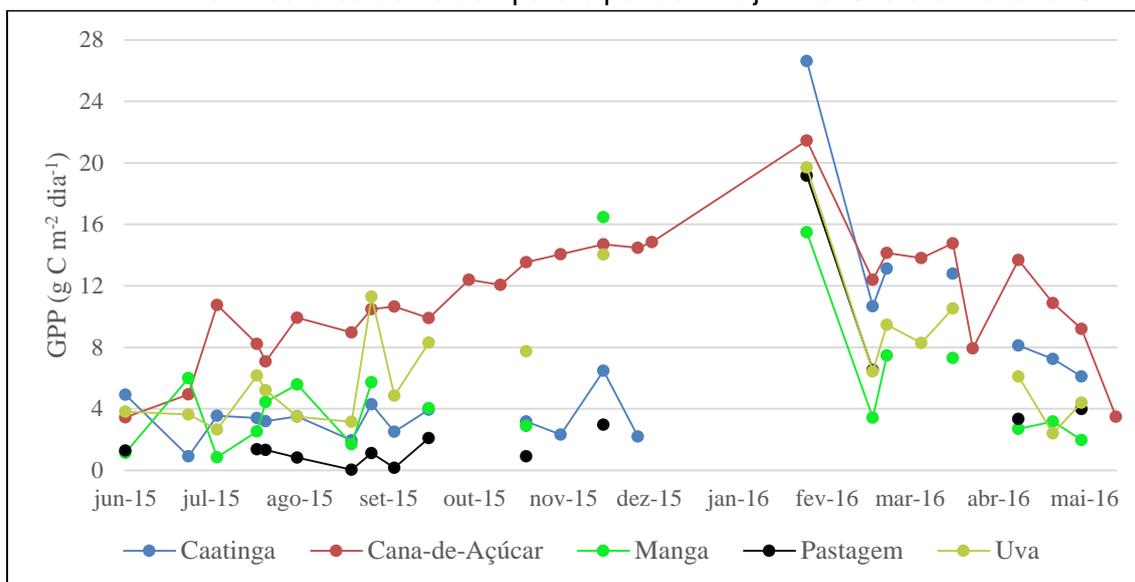
Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.23 mostra a variação da GPP durante o período analisado, observa-se que os maiores valores foram encontrados, do maior para o menor, nas seguintes coberturas: Caatinga, cana-de-açúcar, uva, pastagem e manga. Na área de Caatinga os valores estiveram entre $0,91 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $26,63 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, com uma média de $6,24 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($\pm 5,81$). No período chuvoso a GPP média na área de Caatinga foi $9,50 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($\pm 7,71$) e no seco $3,79 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($\pm 1,73$). Souza et al. (2018) avaliando a GPP na mesma área mapeada, porém utilizando dados de torre micrometeorológica, obtiveram um total diário máximo de $3,2 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ num ano seco. Como observa-se na Figura 5.23 com maiores volumes de chuva houve um acréscimo na GPP nas áreas de pastagem. Os valores da GPP na área de pastagem estiveram entre $0,02 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $19,17 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ tendo um valor médio no período estudado de $3,47 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. No período chuvoso a média foi $6,58 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($\pm 7,32$) atingindo o valor máximo de $19,17 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, após as chuvas de janeiro. No período seco o valor médio ficou em torno de $1,25 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($\pm 1,32$). Os valores obtidos na área de pastagem foram próximos aos encontrados por Wolf et al. (2011) que para o período chuvoso obtiveram uma GPP média de $7 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e no período seco de $2 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ numa pastagem.

Nas áreas irrigadas a GPP seguiu o desenvolvimento das culturas em campo, na cana-de-açúcar os valores ficaram entre $3,45 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $21,45 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ com uma média de $11,19 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($\pm 3,93$). No período chuvoso a GPP média foi $14,15 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($\pm 8,82$), atingido seu máximo em fevereiro com $21,45 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($\pm 2,97$); enquanto no período seco foi $8,82 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($\pm 2,87$). Como observa-se na Figura 5.23 após atingir seu máximo em fevereiro a GPP começou a cair, isso pode ser devido à suspensão da irrigação que beneficia no acúmulo de sacarose. Na área de manga entre julho/2015 e outubro/2015, onde a cultura estava no final da frutificação, crescimento e maturação das frutos os valores encontravam-se entre $0,85 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $6 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ com uma média de $3,55 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($\pm 2,05$). Em dezembro o cultivo da manga apresentou seu máximo de GPP com valor de $16,46 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. No período seco a GPP da cultura da manga foi $3,37 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($\pm 1,89$) e no chuvoso $7,96 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($\pm 5,83$). Na área comercial de uva de mesa, a cultura apresentou um comportamento parecido com a manga tendo seus valores entre $2,40 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $19,71 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, e média de $7,08 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($\pm 4,34$). No período seco a GPP média foi $4,94 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($\pm 2,59$) e no período chuvoso $10,29 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($\pm 4,57$).

Os valores encontrados através da metodologia adotada para estimativa da GPP foram próximos aos descritos na literatura, como por exemplo Anderson et al. (2015), que encontraram em duas áreas comerciais de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento no Havaí os valores de GPP entre $1,9 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $25,9 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, e $5,3 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $21,7 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

Figura 5.23 – Média zonal da $GPP_{B.A.}$ para os principais tipos de uso e cobertura da terra da área de estudo para o período de junho/2015 até maio/2016.



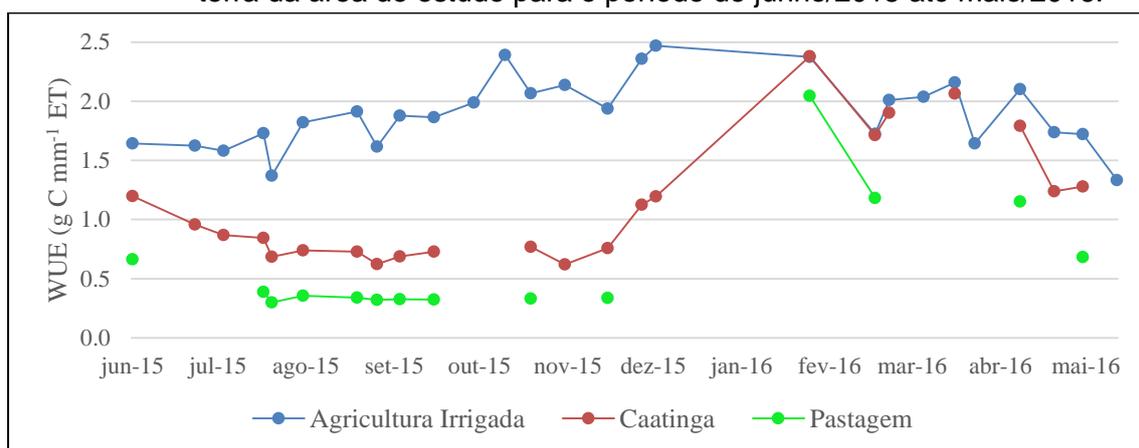
Fonte: Produção do autor.

Observa-se na Figura 5.24 que a classe agricultura irrigada (cana-de-açúcar+manga+uva) apresentou os maiores valores durante a maior parte do período analisado quando comparado com as classes Caatinga e pastagem. A classe agricultura possui uma WUE média de $1,90 \text{ g C mm}^{-1} \text{ ET}$ ($\pm 0,30$) e seus valores variaram entre $1,33 \text{ g C mm}^{-1} \text{ ET}$ e $2,47 \text{ g C mm}^{-1} \text{ ET}$. No período chuvoso a WUE média é $2,09 \text{ g C mm}^{-1} \text{ ET}$ ($\pm 0,25$) e no período seco o valor foi de $1,75 \text{ g C mm}^{-1} \text{ ET}$ ($\pm 0,26$). Ressalta-se que a WUE pode mudar dependendo da cultura trabalhada uma vez que a composição das espécies vegetais e suas estruturas afetam na WUE. Além disso, a WUE das áreas de agricultura irrigada foram superiores a da pastagem e Caatinga, principalmente no período seco; porém ressalta-se que os cultivos irrigados são dependentes da irrigação para sobrevivência e na falta desta não conseguirão manter seu desenvolvimento em campo visto que suas demandas hídricas são superiores a precipitação média da região. Comparando os valores adquiridos na classe agricultura com a literatura, de Oliveira et al. (2017) numa área agrícola obtiveram uma WUE média de $1,02 \text{ g C mm}^{-1} \text{ ET}$ na região amazônica; Lu e Zhuang (2010) obtiveram uma WUE média de $2,13 \text{ g C mm}^{-1} \text{ ET}$ nos EUA; e Cabral et al. (2013) obtiveram para uma área de cana-de-açúcar no Brasil uma WUE média de $4,3 \text{ g C mm}^{-1} \text{ ET}$. Nota-se no gráfico que a WUE na classe

agricultura irrigada, como as variáveis ET_a e GPP acompanharam o desenvolvimento das culturas em campo.

Quanto as classes Caatinga e pastagem, a primeira mostrou maiores valores de WUE, observa-se que o perfil temporal da WUE para ambas as classes foi bem semelhante aos perfis de NDVI para as mesmas. Na área de Caatinga a média da WUE durante os meses de junho e dezembro foi $0,84 \text{ g C mm}^{-1} \text{ ET}$ ($\pm 0,20$), variando entre $0,62 \text{ g C mm}^{-1} \text{ ET}$ e $1,20 \text{ g C mm}^{-1} \text{ ET}$, após os eventos de precipitação atingiu o valor de $2,38 \text{ g C mm}^{-1} \text{ ET}$ em fevereiro. A área de pastagem teve um comportamento semelhante ao da Caatinga durante o período estudado, porém a WUE foi menor como observado na Figura 5.24 Na pastagem os valores da WUE ficaram entre $0,32 \text{ g C mm}^{-1} \text{ ET}$ e $2,05 \text{ g C mm}^{-1} \text{ ET}$, com média de $0,68 \text{ g C mm}^{-1} \text{ ET}$ ($\pm 0,53$). Durante o período seco a WUE média foi de $0,44 \text{ g C mm}^{-1} \text{ ET}$ ($\pm 0,16$) e no período chuvoso de $1 \text{ g C mm}^{-1} \text{ ET}$ ($\pm 0,71$). Quando compara-se os valores obtidos por cada classe com a literatura, de Oliveira et al. (2017) obtiveram uma WUE média de $1,10 \text{ g C mm}^{-1} \text{ ET}$ numa área de pastagem na região amazônica utilizando dados de torre micrometeorológica, valor próximo aos encontrados. Lu e Zhuang (2010) nos EUA em ecossistemas de savana obtiveram uma WUE de $2,43 \text{ g C mm}^{-1} \text{ ET}$.

Figura 5.24 – Média zonal da $WUE_{B.A.METRIC}$ para os principais tipos de cobertura da terra da área de estudo para o período de junho/2015 até maio/2016.



Fonte: Produção do autor.

6 CONCLUSÃO

As conclusões apresentadas são relativas a cada objetivo específico estabelecido.

- a) Os dados de LST do MOD11A1 superestimaram as medidas de campo em 5,27%, além disso, a LST proveniente do MOD11A1 acompanhou o comportamento dos dados reais. A metodologia para estimativa do *blue-sky* albedo utilizando o produto MCD43A3 mostrou-se eficiente apresentando uma boa concordância ($r_{CTP} = 0,59$ e $r_{CAN} = 0,91$) com os dados provenientes das torres micrometeorológicas, principalmente para a área de cana-de-açúcar. O $IAF_{MOD15A2H}$ subestimou os dados de campo em ~59% (em média), porém, mesmo assim, o produto ainda pode ser utilizado para estudar o comportamento da vegetação na região visto que apresentou uma boa correlação (r) com os dados reais com valores entre 0,76 (CTP) e 0,65 (CAN). O MOD16A2 superestimou em 101% as observações das torres micrometeorológicas no sítio CTP, porém o mesmo ainda pode ser utilizado para estudar o comportamento da vegetação Caatinga, visto que apresentou uma alta correlação com os dados de campo. Diferente do que aconteceu no sítio CAN que os valores estimados não tiveram correlação com os dados da torre. Grande parte dos erros nos produtos MOD15A2H e MOD16A2 podem ser devido ao mapa de biomas e suas constantes utilizadas para cada os tipos de vegetação da área de estudo, como também os dados de entrada que são utilizados para geração dos produtos. Incluso, os erros no MOD16A2 podem ser devido ao MOD15A2H que é um dos produtos de entrada;
- b) Quanto aos produtos de IAF e ET_a oriundos da metodologia do METRIC, os dados de IAF da mesma forma que no MOD15A2H subestimaram as observações reais em, aproximadamente, 63% (em média) mesmo assim o IAF proveniente do METRIC pode ser utilizado para analisar tendência, devido apresentar um r de 0,71

(CTP) e 0,93 (CAN). O modelo METRIC pode ser utilizado na estimativa da ET_a na área de estudo, utilizando como dados de entrada o BLSA, o produto de LST do MOD11A1 e o GMTED2010. Quanto ao desempenho do METRIC os melhores valores observados foram vistos nas áreas de agricultura. Um ponto importante é o cuidado na etapa de calibração do modelo, devendo-se atentar para a escolha dos *pixels* âncora. Como visto houve uma grande dificuldade para selecionar bons *pixels* durante a época chuvosa (novembro – abril) da região, especificamente, entre dezembro e maio devido à maior umidade residual nos solos, o que acarretou na pequena diferença de amplitude entre as temperaturas das áreas de solo com pouca vegetação ou exposto e as de áreas agrícolas. Em períodos de escassez hídrica devido ao forte contraste entre as áreas irrigadas e de vegetação natural o modelo pode superestimar a ET_a nas áreas de Caatinga. Ainda sobre o modelo METRIC, destaca-se que houveram datas que o modelo não completou a etapa de calibração, estes dias coincidiram com datas em que o solo estava a vários dias sem umidade;

- c) Não recomenda-se utilizar a WUE proveniente da razão entre os produtos MOD17A2H e MOD16A2 para a região. No entanto a WUE oriunda da relação entre a GPP (BASTIAANSEN; ALI, 2003) e a ET_a do METRIC pode ser utilizada em estudos nas sub-bacias, porém existe uma perda de informação devido aos valores negativos presentes na estimativa do LE, o qual é utilizado na obtenção da FE que influencia no cálculo da GPP;
- d) A sub-bacia das Garças recebeu as maiores precipitações durante os anos de 2011, 2012, 2015 e 2016. Essa maior disponibilidade hídrica acabou afetando no desenvolvimento da cobertura vegetal natural desta que apresentou os maiores valores médios de NDVI e albedo, por exemplo. A vegetação da Caatinga é fortemente dependente das chuvas para seu desenvolvimento. As áreas irrigadas apresentaram

os maiores valores da GPP e WUE, podendo-se diferenciar as áreas irrigadas das de vegetação natural durante o período seco. Deve-se mencionar que as áreas irrigadas são dependentes da disponibilidade de água proveniente do rio São Francisco para conseguirem manter seu desenvolvimento e qualquer redução ou suspensão na captação da água afetará na produção agrícola da região e no comportamento da GPP para esse tipo de cobertura. Os maiores valores médios da WUE foram encontrados, respectivamente, nas sub-bacias: das Garças, Pontal e Curaçá. Mesmo sendo dependente do período chuvoso a vegetação da Caatinga consegue manter uma WUE média no período seco próxima a das áreas irrigadas. Na área de estudo houve pouca variação do albedo no ano, sendo os maiores valores médios encontrados nas áreas de agricultura seguido pelas de pastagem e Caatinga;

- e) Os tipos de cobertura da terra mapeados de Caatinga e pastagem responderam bem as fortes chuvas que ocorreram no mês de janeiro e durante o resto do período chuvoso apresentando um forte desenvolvimento como foi observado pelos valores de NDVI e GPP, como também na WUE mesmo vindo de 7 meses com baixos valores de precipitação. A WUE apresentou comportamento semelhante ao do NDVI. Estatisticamente, as áreas de agricultura irrigadas mapeadas apresentaram diferentes demandas hídricas (ET_a) e fixação de carbono (GPP), porém não houve diferença entre estas quanto a WUE. Os dados de NDVI, ET_a e GPP conseguiram mostrar bem o comportamento das coberturas mapeadas quanto as suas fenologias em campo.

Considerações finais

No bioma da Caatinga os produtos MODIS de temperatura de superfície e albedo mostraram-se eficientes na estimativa destas variáveis, porém deve-se atentar que o primeiro superestima a LST. O IAF proveniente do MOD15A2H subestima em demasia os valores de superfície, por isso não é recomendado quando o interesse é avaliar os valores de IAF, mas pode ser utilizado para estudar a tendência. Com relação ao dados de ET provenientes do MOD16A2, não houve correlação com as observações para o sítio CAN, porém houve para o sítio CTP. Os valores estimados da ET para o CTP superestimaram, excessivamente, os dados de superfície. Devido aos erros que o produto do acumulado da ET do MOD16A2 apresenta, são necessários mais estudos para que seja descoberto a fonte dos erros nos dados de entrada utilizados na obtenção da ET e informações de superfície para validação. Caso se tenha interesse em estudar a WUE ou a ET_a para a região do Submédio do São Francisco, recomenda-se utilizar o modelo METRIC e a metodologia de Bastiaanssen e Ali (2003) para obtenção da GPP, porém deve-se atentar para a etapa de seleção dos *pixels* candidatos do modelo METRIC para que seja feita uma boa calibração e bons resultados sejam obtidos. Sobre os fluxos de carbono e água, estes comportam-se de forma diferente nas áreas de vegetação natural e nas áreas de agricultura irrigada, sendo que o comportamento da Caatinga aproximou-se mais da área mapeada de pastagem por esta não ser irrigada, porém a WUE da Caatinga é superior ao da pastagem, o que pode ser devido as alterações morfológicas e fisiológicas da vegetação da Caatinga que a permitem fazer um melhor uso dos recursos hídricos. As áreas de vegetação natural mesmo apresentando uma dependência aos eventos de chuva para seu desenvolvimento, apresentaram valores não tão distantes aos de agricultura irrigada, e no período chuvoso equipararam-se a WUE das áreas irrigadas. Notou-se que a ET_a , GPP e WUE nos cultivos irrigados acompanham seus desenvolvimentos no campo. Resumindo, em relação aos fluxos de carbono e água a dinâmica da vegetação da Caatinga é diferente das áreas de agricultura irrigada e pastagem, pois a substituição da vegetação natural por estes usos alterará os fluxos de água e

carbono destas áreas afetadas. Deve-se ressaltar que mesmo a WUE das áreas de agricultura irrigada sendo maior que a da Caatinga, os cultivos irrigados são dependentes da prática da irrigação e na ausência desta não manterão o mesmo desenvolvimento, visto que a precipitação média anual da região é bem menor que a demanda hídrica das culturas avaliadas. São necessários mais estudos na região do bioma da Caatinga sobre a dinâmica dos fluxos de carbono e água afim de conhecer o papel ecossistêmico da vegetação da Caatinga com relação a estes fluxos, visto que, ainda é um bioma pouco estudado em comparação ao Cerrado e Amazônia.

Sugestões para trabalhos futuros

- Para estudos futuros sugere-se avaliar as estimativas da ET_a pelo METRIC utilizando a resistência aerodinâmica para transporte de calor extra (ALLEN et al., 2010) com o intuito de analisar a possibilidade de obtenção da ET_a em dias de alta escassez hídrica e avaliar se a quantidade de valores negativos na estimativa do LE diminuem;
- Melhorar o processo de automatização do modelo METRIC implementado em linguagem R;
- Avaliar os produtos utilizados como entrada nos produtos MOD16A2 e MOD15A2H com o intuito de melhorar a acurácia destes para o bioma da Caatinga;
- Estimar a ET_a , GPP e a WUE, e analisá-los utilizando imagens de sensores de resolução espacial melhor que a do MODIS como por exemplo as imagens do sensor OLI, para com isso ampliar a compreensão do comportamento dos diferentes tipos de uso/cobertura da terra, possibilitar o estudo dos impactos da remoção das áreas de Caatinga para agricultura e a entender a dinâmica dos usos/coberturas da terra em anos chuvosos, secos e regulares na região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; KJAERGAARD, J. **METRIC - Mapping EvapoTranspiration ag High Resolution: applications manual**. Kimberly, Idaho: University of Idaho, 2010. 175 p.
- ALLEN, R.; IRMAK, A.; TREZZA, R.; HENDRICKX, J. M. H.; BASTIAANSEN, W.; KJAERGAARD, J. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. **Hydrological Processes**, v. 25, n. 26, p. 4011–4027, 30 dez. 2011.
- ALLEN, R. G. **RAPID long-wave radiation calculations and model comparisons**. Kimberly, Idaho: University of Idaho, 2000.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. **Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de agua de los cultivos**. Roma: FAO, 2006. 297 p.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R.; WRIGHT, J. L.; BASTIAANSEN, W.; KRAMBER, W.; LORITE, I.; ROBISON, C. W. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC): aApplications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, n. 4, p. 395–406, ago. 2007.
- ANDERSON, R. G.; TIRADO-CORBALÁ, R.; WANG, D.; AYARS, J. E. Long-rotation sugarcane in Hawaii sustains high carbon accumulation and radiation use efficiency in 2nd year of growth. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 199, p. 216–224, jan. 2015.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; NOLETO, D. H.; BASTOS, E. A.; MOURA, M. S. B.; ANJOS, J. C. R. Demanda hídrica da cana-de-açúcar, por balanço de energia, na microrregião de Teresina, Piauí. **Agrometeoros**, v. 25, n. 1, p. 217–226, 2017.

ANDRÉ, R. G. B.; MENDONÇA, J. C.; PINHEIRO, F. M. A.; MARQUES, V. S.; MARQUES, J. Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar. parte 1: balanço de energia e parâmetros derivados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 4, p. 535–542, dez. 2010.

ARAÚJO FILHO, J. A. DE. **Manejo pastoril sustentável da Caatinga**. Recife: Projeto Dom Helder Câmara, 2013.

ARAUJO, G. L.; REIS, E. F.; MOREIRA, G. R. Correlações entre variáveis climatológicas e seus efeitos sobre a evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada - RBAI**, v. 5, n. 2, p. 96–104, 2011.

BASTIAANSEN, W. G. M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain**. 1995. 190 p. Thesis (Doctor) - Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, 1995.

BASTIAANSEN, W. G. M.; PELGRUM, H.; WANG, J.; MA, Y.; MORENO, J. F.; ROERINK, G. J.; VAN DER WAL, T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). **Journal of Hydrology**, v. 212–213, n. JANUARY, p. 213–229, dez. 1998.

BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, n. 1–2, p. 87–100,

2000.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; BRITO, R. A. L.; BOS, M. G.; SOUZA, R. A.; CAVALCANTI, E. B.; BAKKER, M. M. Low cost satellite data for monthly irrigation performance monitoring: benchmarks from Nilo Coelho, Brazil. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 15, n. 1, p. 53–79, 2001.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; ALI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 94, n. 3, p. 321–340, mar. 2003.

BOSMANS, J. H. C.; VAN BEEK, L. P. H.; SUTANUDJAJA, E. H.; BIERKENS, M. F. P. Hydrological impacts of global land cover change and human water use. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 11, p. 5603–5626, 14 nov. 2017.

BRASIL. MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Região Integrada de Desenvolvimento - RIDE Petrolina-Juazeiro**. 2018. Disponível em: <http://www.mi.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=e7f5d3d8-e874-4968-8dda-210b04e07026&groupId=63635>. Acesso em: 4 fev. 2018.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Caderno da região hidrográfica do São Francisco**. Brasília: MMA, 2006. 148 p. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/161/_publicacao/161_publicacao03032011023538.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2018.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Atualização e complementação do diagnóstico do macrozoneamento ecológico-**

econômico da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco: relatório da atualização e complementação do diagnóstico do meio socioeconômico da BHSF. Brasília: MMA, 2016. 262 p.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Caatinga:** monitoramento do desmatamento dos biomas brasileiros por satélite: 2009/2010. Brasília: MMA, 2016. 32 p.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Caatinga:** monitoramento do desmatamento dos biomas brasileiros por satélite – 2010/2011. Brasília: MMA, 2016, 32 p.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Caatinga.** 2017. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/biomas/Caatinga>>. Acesso em: 28 jan. 2018.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Mapas de Cobertura Vegetal.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/informma/item/7626-mapas-de-cobertura-vegetal>>. Acesso em: 12 jul. 2018.

BRASILEIRO, R. S. Alternativas de desenvolvimento sustentável no semiárido nordestino: da degradação à conservação. **Scientia Plena**, v. 5, n. 5, p. 1–12, 2009.

BRITO, L. T. L.; MOURA, M. S. B.; GAMA, G. F. B. **Potencialidades da água de chuva no semi-árido brasileiro.** Petrolina, PE: Embrapa Semi-Árido, 2007.

BRUTSAERT, W. **Evaporation into the Atmosphere.** Dordrecht: Springer

Netherlands, 1982.

CABRAL, O. M. R.; ROCHA, H. R.; GASH, J. H.; LIGO, M. A.V.; RAMOS, N. P.; PACKER, A. P.; BATISTA, E. R. Fluxes of CO₂ above a sugarcane plantation in Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 182–183, p. 54–66, dez. 2013.

CARRASCO-BENAVIDES, M. et al. Crop coefficients and actual evapotranspiration of a drip-irrigated Merlot vineyard using multispectral satellite images. **Irrigation Science**, v. 30, n. 6, p. 485–497, 15 nov. 2012.

CARRASCO-BENAVIDES, M.; ORTEGA-FARÍAS, S.; LAGOS, L. O.; KLEISSL, J.; MORALES, L.; POBLETE-ECHEVERRÍA, C.; ALLEN, R. G. Parameterization of the satellite-based model (METRIC) for the estimation of instantaneous surface energy balance components over a drip-irrigated vineyard. **Remote Sensing**, v. 6, n. 11, p. 11342–11371, 14 nov. 2014.

CARVALHO, H. F. S.; MOURA, M. S. B.; SILVA, T. G. F.; RODRIGUES, C. T. A. Controlling factors of ‘Caatinga’ and sugarcane evapotranspiration in the sub-middle São Francisco Valley. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 4, p. 225–230, abr. 2018.

CASTRO, C. N.; PEREIRA, C. N. Revitalização do Rio São Francisco. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental (IPEA)**, p. 69-76, 2017. Disponível em: <<http://www.mi.gov.br/web/projeto-sao-francisco/licenciamento-ambiental>>.

CHEN, C.; KNYAZIKHIN, Y.; PARK, T.; YAN, K.; LYAPUSTIN, A.; WANG, Y.; YANG, B.; MYNENI, R. Prototyping of LAI and FPAR retrievals from MODIS

Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction (MAIAC) data. **Remote Sensing**, v. 9, n. 4, p. 370, 15 abr. 2017.

CHOI, M.; KIM, T. W.; PARK, M.; KIM, S. J. Evapotranspiration estimation using the Landsat-5 thematic mapper image over the Gyungan watershed in Korea. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 15, p. 4327–4341, 10 ago. 2011.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO SÃO FRANCISCO (CBHSF). **Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco 2016-2025**. [S.l.]: CBHSF, 2016. 74p.

CORREIA, R.; KIILL, L.; MOURA, M. S. B.; CUNHA, T.; JESUS-JÚNIOR, L.; ARAÚJO, J. A região semiárida brasileira. In: VOLTOLINI, T. V. **Produção de caprinos e ovinos no Semiárido**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2011. p. 21–48.

CUNHA, T. J. F.; SILVA, F. H. B. B.; DA SILVA, M. S. L.; PETRERE, V. G.; SÁ, L. B.; OLIVEIRA NETO, M. B.; CAVALCANTI, A. C. **Solos do submédio do Vale do São Francisco: potencialidades e limitações para uso agrícola** - Documentos 211. Petrolina, PE: Embrapa, 2008. 60 p. Disponível em: <
<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/161560/solos-do-submedio-do-vale-do-sao-francisco-potencialidades-e-limitacoes-para-uso-agricola> >.

DA SILVEIRA, H. L. F.; GALVÃO, L. S.; SANCHES, I. D. A.; DE SÁ, I. B.; TAURA, T. A. Use of MSI/Sentinel-2 and airborne LiDAR data for mapping

vegetation and studying the relationships with soil attributes in the Brazilian semi-arid region. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 73, p. 179–190, 1 dez. 2018.

DANIELSON, J.; GESCH, D. **Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010(GMTED2010)**. Reston: U.S. Geological Survey, 2011. 26p.

DE AZEVEDO, P. V.; DA SILVA, B. B.; DA SILVA, V. P. Water requirements of irrigated mango orchards in northeast Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 58, n. 3, p. 241–254, fev. 2003.

DE LA FUENTE-SÁIZ, D.; ORTEGA-FARÍAS, S.; FONSECA, D.; ORTEGA-SALAZAR, SAMUEL; KILIC, A.; ALLEN, R. Calibration of METRIC model to estimate energy balance over a drip-irrigated apple orchard. **Remote Sensing**, v. 9, n. 7, p. 670, 29 jun. 2017.

DE MOURA, M. S. B. **Precipitação e evaporação**. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/bioma_Caatinga/arvore/CONT000g798rt3p02wx5ok0wtedt3nd3c63l.html>. Acesso em: 18 jan. 2019.

DE OLIVEIRA, C. F. S.; MANZIONE, R. L.; ALBUQUERQUE FILHO, J. Large-scale spatial modeling of crop coefficient and biomass production in agroecosystems in southeast Brazil. **Horticulturae**, v. 4, n. 4, p. 44, 22 nov. 2018.

DE OLIVEIRA, G.; BRUNSELL, N.; MORAES, E. C.; BERTANI, G.; DOS SANTOS, T.; SHIMABUKURO, Y.; ARAGAO, L. E. O. C. Use of MODIS sensor images combined with reanalysis products to retrieve net radiation in Amazonia.

Sensors, v. 16, n. 7, p. 956, 24 jun. 2016.

DE OLIVEIRA, G.; BRUNSELL, N.; MORAES, E. C.; SHIMABUKURO, Y.; BERTANI, G.; DOS SANTOS, T.; ARAGAO, L. E. O. C. Evaluation of MODIS-based estimates of water-use efficiency in Amazonia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 19, p. 5291–5309, 2 out. 2017.

DECAGON DEVICES. **AccuPAR PAR/LAI ceptometer**: model LP-80: operator's manual. Pullma, WA: Decagon, 2011. 81 p.

DIDAN, K. **MOD13A1 MODIS/terra vegetation indices 16-day L3 global 500m SIN grid V006 [Data set]**. 2015. Disponível em: https://cmr.earthdata.nasa.gov/search/concepts/C194001237-LPDAAC_ECS.html.

EMBRAPA SEMIÁRIDO. Manejo de poda. In: MOUCO, M. A. d C. et al. (Eds.). **Cultivo da mangueira**. 3.ed. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2015.

ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES INSTITUTE OF THE AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE). **The ASCE standardized reference evapotranspiration equation**. EWRI; ASCE, 2005. Disponível em: <https://www.persee.fr/doc/arasi_0004-3958_1965_num_11_1_919>.

FIELD, C. B.; RANDERSON, J. T.; MALMSTRÖM, C. M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, n. 1, p. 74–88, jan. 1995.

FOLHES, M. T.; RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Remote sensing for irrigation

water management in the semi-arid Northeast of Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 10, p. 1398–1408, out. 2009.

FOOLAD, F.; BLANKENAU, P.; KILIC, A.; ALLEN, R. G.; HUNTINGTON, J. L.; ERICKSON, T. A.; OZTURK, D.; MORTON, C. G.; ORTEGA, S.; RATCLIFFE, I.; FRANZ, T. E.; THAU, D.; MOORE, R.; GORELICK, N.; KAMBLE, B.; REVELLE, P.; TREZZA, R.; ZHAO, W.; ROBISON, C. W. Comparison of the automatically calibrated Google evapotranspiration application: EEFlux and the manually calibrated METRIC application. **Preprints**, v. 2018070040, July, 2018.

GARIGLIO, M. A.; KAGEYAMA, P. Y. **Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da Caatinga**. Brasília,DF: MMA, 2010. 368 p.

GASCOIN, S.; GUÐMUNDSSON, S.; AÐALGEIRSDÓTTIR, G.; PÁLSSON, F.; SCHMIDT, L.; BERTHIER, E.; BJÖRNSSON, H. Evaluation of MODIS Albedo product over ice caps in iceland and impact of volcanic eruptions on their Albedo. **Remote Sensing**, v. 9, n. 5, p. 399, 25 abr. 2017.

GIULIETTI, A. M.; NETA DU BOCAGE, A. L.; CASTRO, A. A. J. F.; GAMARRA-ROJAS, C. F. L.; SAMPAIO, E. V.S. B.; VIRGÍNIO, J. F.; QUEIROZ, L. P.; FIGUEIREDO, M. A.; RODAL, M. J. N.; BARBOSA, M. R. V.; HARLEY, R. M. Diagnóstico da vegetação nativa do bioma Caatinga. In: SILVA, J. M. C. et al. (Eds.). **Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente; Universidade Federal de Pernambuco, 2003. p. 47–90.

HARRISON, L. P. **Fundamental concepts and definitions relating to**

humidity. [S.l.]: Reinhold Publishing, 1965.

HEALEY, N. C.; IRMAK, A.; ARKEBAUER, T. J.; BILLESBACH, D. P.;
LENTERS, J. D.; HUBBARD, K. G.; ALLEN, R. G.; KJAERGAARD, J. Remote
sensing and in situ-based estimates of evapotranspiration for subirrigated
meadow, dry valley, and upland dune ecosystems in the semi-arid sand hills of
Nebraska, USA. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 25, n. 3, p. 151–178, 24
set. 2011.

HEINSCH, F. A.; MAOSHENG ZHAO; RUNNING, S. W.; KIMBALL, J. S.;
NEMANI, R. R.; DAVIS, K. J.; BOLSTAD, P. V.; COOK, B. D.; DESAI, A. R.;
RICCIUTO, D. M.; LAW, B. E.; OECHEL, W. C.; HYOJUNG KWON; HONGYAN
LUO; WOFSY, S. C.; DUNN, A. L.; MUNGER, J. W.; BALDOCCHI, D. D.;
LIUKANG XU; HOLLINGER, D. Y.; RICHARDSON, A. D.; STOY, P. C.;
SIQUEIRA, M. B. S.; MONSON, R. K.; BURNS, S. P.; FLANAGAN, L. B.
Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from MODIS using
regional tower eddy flux network observations. **IEEE Transactions on
Geoscience and Remote Sensing**, v. 44, n. 7, p. 1908–1925, jul. 2006.

HOPKINS, W. G. **Correlation coefficient**: a new view of statistics. Disponível
em: <<https://www.sportsci.org/resource/stats/correl.html>>. Acesso em: 9 mar.
2019.

HUETE, A. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images
for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, n. 3, p. 440–451,
mar. 1997.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE.

Produção Agrícola Municipal (PAM) - 2017. Disponível em:

<<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>>. Acesso em: 20 jan. 2019.

ITO, A.; INATOMI, M. Water-use efficiency of the terrestrial biosphere: a model analysis focusing on interactions between the global carbon and water cycles.

Journal of Hydrometeorology, v. 13, n. 2, p. 681–694, abr. 2012.

JANSSON, C.; WULLSCHLEGER, S. D.; KALLURI, U. C.; TUSKAN, G. A.

Phytosequestration: carbon biosequestration by plants and the prospects of genetic engineering. **BioScience**, v. 60, n. 9, p. 685–696, out. 2010.

JENSEN, M. E.; ALLEN, R. G.; BURMANN, R. D.; ALLEN, R. G. **Evaporation, evapotranspiration, and irrigation water requirements.** Reston, VA:

American Society of Civil Engineers, 2016.

JONES, L. A.; KIMBALL, J. S.; REICHLE, R. H.; MADANI, N.; GLASSY, J.;

ARDIZZONE, J. V.; COLLIANDER, A.; CLEVERLY, J.; DESAI, A. R.; EAMUS,

D.; EUSKIRCHEN, E. S.; HUTLEY, L.; MACFARLANE, C.; SCOTT, R. L. The

SMAP Level 4 Carbon Product for Monitoring Ecosystem Land–Atmosphere CO

2 Exchange. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 55,

n. 11, p. 6517–6532, nov. 2017.

JUNG, M.; REICHSTEIN, M.; CIAIS, P.; SENEVIRATNE, S. I.; SHEFFIELD, J.;

GOULDEN, M. L.; BONAN, G.; CESCATTI, A.; CHEN, J.; DE JEU, R.;

DOLMAN, A. J.; EUGSTER, W.; GERTEN, D.; GIANELLE, D.; GOBRON, N.;

HEINKE, J.; KIMBALL, J.; LAW, B. E.; MONTAGNANI, L.; MU, Q.; MUELLER,

B.; OLESON, K.; PAPALE, D.; RICHARDSON, A. D.; ROUPSARD, O.;
RUNNING, S.; TOMELLERI, E.; VIOVY, N.; WEBER, U.; WILLIAMS, C.;
WOOD, E.; ZAEHLE, S.; ZHANG, K. Recent decline in the global land
evapotranspiration trend due to limited moisture supply. **Nature**, v. 467, n.
7318, p. 951–954, 10 out. 2010.

KEELING, C. D.; PIPER, S. C.; HEIMANN, M. A three-dimensional model of
atmospheric CO₂ transport based on observed winds: 4. mean annual
gradients and interannual variations. In: PETERSON, D.H. (Ed.). **Aspects of
climate variability in the Pacific and the Western Americas**. Washington:
American Geophysical Union, 1989. p.165–236.

KIMBALL, J. S.; JONES, L. A.; GLASSY, J.; MADANI, N.; REICHLER, R. H.
Monitoring ecosystem-atmosphere CO₂ exchange response to recent (2015-
2016) climate variability using the SMAP L4 carbon product. **International
Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, v. 2017–July, p.
2557–2560, 2017.

KING, D. A.; TURNER, D. P.; RITTS, W. D. Parameterization of a diagnostic
carbon cycle model for continental scale application. **Remote Sensing of
Environment**, v. 115, n. 7, p. 1653–1664, jul. 2011.

KUMMEROW, C.; SIMPSON, J.; THIELE, O.; BARNES, W.; CHANG, A. T. C.;
STOCKER, E.; ADLER, R. F.; HOU, A.; KAKAR, R.; WENTZ, F.; ASHCROFT,
P.; KOZU, T.; HONG, Y.; OKAMOTO, K.; IGUCHI, T.; KUROIWA, H.; IM, E.;
HADDAD, Z.; HUFFMAN, G.; FERRIER, B.; OLSON, W. S.; ZIPSER, E.;
SMITH, E. A.; WILHEIT, T. T.; NORTH, G.; KRISHNAMURTI, T.; NAKAMURA,

K. The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit. **Journal of Applied Meteorology**, v. 39, n. 12, p. 1965–1982, 2000.

LAMBIN, E. F.; TURNER, B. L.; GEIST, H. J.; AGBOLA, S. B.; ANGELSEN, A.; BRUCE, J. W.; COOMES, O. T.; DIRZO, R.; FISCHER, G.; FOLKE, C.; GEORGE, P. S.; HOMEWOOD, K.; IMBERNON, J.; LEEMANS, R.; LI, X.; MORAN, E. F.; MORTIMORE, M.; RAMAKRISHNAN, P. S.; RICHARDS, J. F.; RICHARDS, J. F.; SKÅNES, H.; STEFFEN, W.; STONE, G. D.; SVEDIN, U.; VELDKAMP, T. A.; VOGEL, C.; XU, J. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. **Global Environmental Change**, v. 11, n. 4, p. 261–269, dez. 2001.

LEAL, I. R.; DA SILVA, J. M. C.; TABARELLI, M.; LACHER, T. E. Changing the course of biodiversity conservation in the Caatinga of northeastern Brazil. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 701–706, jun. 2005.

LIBERATO, A. M. Albedo à superfície a partir de imagens Landsat 5 - TM m áreas de floresta em pastagem na Amazônia. **Revista de Geografia (UFPE)**, v. 28, n. 1, p. 110–119, 2011.

LIMA, J. E. F. W.; DOS SANTOS, P. M. C.; CHAVES, A. G.M.; SCILEWSKI, L. R. **Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na Bacia do Rio São Francisco**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2001.

LIMA, J. P. R. A Economia do semi-árido nordestino: desenvolvimento recente e transformações em Curos. In: NASCIMENTO, A. LIMA, M. C. **O nordeste**

brasileiro em questão: uma agenda para reflexão. Recife: UFPE, 2014. p. 201–237.

LU, X.; ZHUANG, Q. Evaluating evapotranspiration and water-use efficiency of terrestrial ecosystems in the conterminous United States using MODIS and AmeriFlux data. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 9, p. 1924–1939, set. 2010.

MA, W.; HAFEEZ, M.; RABBANI, U.; ISHIKAWA, H.; MA, Y. Retrieved actual ET using SEBS model from Landsat-5 TM data for irrigation area of Australia. **Atmospheric Environment**, v. 59, p. 408–414, nov. 2012.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; BESERRA, E. A.; LACERDA, F. F. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. In: MEDEIROS, S. S. et al. (Eds.). **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas.** Campina Grande, PB: INSA, 2011. p. 383–422.

MARENGO, J. A. O. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade.** 2. ed. Brasília, DF: MMA, 2007. 214 p.

MARENGO, J. A. O.; ALVES, L. M.; ALVALA, R. C. S.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. L. L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, p. 1973–1985, 2018.

MATA, M. V. M.; HOELZEMANN, J. J.; SOUSA NETO, E. R.; AGUIAR, A. P. D.; VIEIRA, R. M.S. P.; ASSIS, T. O.; OMETTO, J. P. H. B. Emissões de CO₂ provenientes do uso e mudanças no uso da terra no bioma Caatinga no

nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 1, p. 144–155, 15 dez. 2015.

MENEZES, R.; SAMPAIO, E. V. S. B.; GIONGO, V.; PÉREZ-MARIN, A. M. Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Caatinga Biome. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, n. 3 suppl, p. 643–653, ago. 2012.

MIRANDA, E. E. DE. Irrigação, tecnologia e “reexistência”: pobreza no Vale do Rio São Francisco. **AgroANALYSIS**, p. 32–34, 2017.

MIRANDA, R. D. Q.; GALVÍNCIO, J. D.; MOURA, M. S. B.; JONES, C. A.; SRINIVASAN, R. Reliability of MODIS evapotranspiration products for heterogeneous dry forest: a study case of Caatinga. **Advances in Meteorology**, v. 2017, n. 14, p. 1–14, 2017.

MOHAN, S.; ARUMUGAM, N. Relative importance of meteorological variables in evapotranspiration: factor analysis approach. **Water Resources Management**, v. 10, n. 1, p. 1–20, fev. 1996.

MONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **The Journal of Applied Ecology**, v. 9, n. 3, p. 747, dez. 1972.

MORAES, E. C.; FRANCHITO, S. H.; RAO, V. B. Evaluation of surface air temperature change due to the greenhouse gases increase with a statistical-dynamical model. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, n. D24, p. D24109, 2005.

MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Improvements to a MODIS global

terrestrial evapotranspiration algorithm. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 8, p. 1781–1800, ago. 2011.

MYNENI, R. B.; WILLIAMS, D. L. On the relationship between FAPAR and NDVI. **Remote Sensing of Environment**, v. 49, n. 3, p. 200–211, set. 1994.

MYNENI, R.; KNYAZIKHIN, Y.; PARK, T. **MCD15A2H MODIS/Terra+Aqua leaf area index/FPAR 8-day L4 global 500m SIN grid V006 [Data set]**. 2015.

Disponível em:

<https://gcmd.gsfc.nasa.gov/KeywordSearch/Metadata.do?Portal=amd&KeywordPath=&OrigMetadataNode=GCMD&EntryId=MCD15A2H6&MetadataView=Full&MetadataType=0&lbnode=mdlb1>.

NOBRE, C. A.; NOBRE, A. D. O balanço de carbono da Amazônia brasileira. **Estudos Avançados**, v. 16, n. 45, p. 81–90, 2002.

NUMATA, I.; KHAND, K.; KJAERGAARD, J.; COCHRANE, M.; SILVA, S. Evaluation of Landsat-based METRIC modeling to provide high-spatial resolution evapotranspiration estimates for Amazonian Forests. **Remote Sensing**, v. 9, n. 1, p. 46, 6 jan. 2017.

OLIVEIRA, B. S. **Estimativa da evapotranspiração da cana-de-açúcar por meio de modelagem do balanço de energia**. 2014. 107 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

OLIVEIRA, B. S.; MORAES, E. C.; RUDORFF, B. F. T.; MATAVELI, G. A. V. Análise do desempenho de modelos de albedo da superfície em áreas de

cana-de-açúcar com dados do sensor MODIS/Terra. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, p. 479–491, 2015.

OLIVEIRA, B. S. **Otimização do modelo METRIC para estimativas de evapotranspiração no cerrado brasileiro**. 2018. 190 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

OLIVEIRA, B. S.; MORAES, E. C.; CARRASCO-BENAVIDES, M.; BERTANI, G.; MATAVELI, G. A. V. Improved Albedo estimates implemented in the METRIC model for modeling energy balance fluxes and evapotranspiration over agricultural and natural areas in the brazilian Cerrado. **Remote Sensing**, v. 10, n. 8, p. 1181, 26 jul. 2018.

OLIVEIRA, G.; MORAES, E. C.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARAGÃO, L. E. O. E C.; MATAVELI, G. A. V. Dados de sensoriamento remoto para o estudo das interações biosfera-atmosfera em ecossistemas amazônicos: uma revisão. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 6, p. 1189–1210, 2017.

OLIVEIRA, M. B. L.; SANTOS, A. J. B.; MANZI, A. O.; ALVALÁ, R. C. S.; CORREIA, M. F.; MOURA, M. S. B. Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de Caatinga e atmosfera do Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3b, p. 378–386, 7 jan. 2006.

OLMEDO, G. F.; ORTEGA-FARÍAS, S.; FUENTE-SÁIZ, D. LA; FONSECA-LUEGO, D.; FUENTES-PEÑAILILLO, F. Water: tools and functions to estimate actual evapotranspiration using land surface energy balance models in R. **The**

R Journal, v. 8, n. 2, p. 352, 2016.

ORTEGA, A. C.; SOBEL, T. F. Desenvolvimento territorial e perímetros irrigados: avaliação das políticas governamentais implantadas nos perímetros irrigados Bebedouro e Nilo Coelho em Petrolina (PE). **Planejamento e Políticas Públicas**, v. 35, p. 87–118, 2010.

PAÇO, T. A.; PÔÇAS, I.; CUNHA, M.; SILVESTRE, J. C.; SANTOS, F. L.; PAREDES, P.; PEREIRA, L. S. Evapotranspiration and crop coefficients for a super intensive olive orchard: an application of SIMDualKc and METRIC models using ground and satellite observations. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 2067–2080, nov. 2014.

PEREIRA, G.; SILVA, MARIA E. S.; MORAES, E. C.; CARDOZO, F. S. Avaliação dos dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM para o Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 139–148, 2013.

PEREZ-MARIN, A. M.; CAVALCANTE, A. M. B.; MEDEIROS, S. S.; TINÔCO, L. B. M.; SALCEDO, I. H. Núcleos de desertificação no semiárido brasileiro : ocorrência natural ou antrópica? **Parcerias Estratégicas**, v. 17, n. 34, p. 87–106, 2012.

PIELKE, R. A.; PITMAN, A.; NIYOGI, D.; MAHMOOD, R.; MCALPINE, C.; HOSSAIN, F.; GOLDEWIJK, K. K.; NAIR, U.; BETTS, R.; FALL, S.; REICHSTEIN, M.; KABAT, P.; DE NOBLET, N. Land use/land cover changes and climate: modeling analysis and observational evidence. **Wiley**

Interdisciplinary Reviews: Climate Change, v. 2, n. 6, p. 828–850, nov. 2011.

PÔÇAS, I.; CUNHA, M.; PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G. Using remote sensing energy balance and evapotranspiration to characterize montane landscape vegetation with focus on grass and pasture lands. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 21, n. 1, p. 159–172, abr. 2013.

POTTER, C. S.; RANDERSON, J. T.; FIELD, C. B.; MATSON, P. A.; VITOUSEK, P. M.; MOONEY, H. A.; KLOOSTER, S. A. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 7, n. 4, p. 811–841, dez. 1993.

PROJETO MAPBIOMAS. **Coleção 3.0 da série anual de mapas de cobertura e uso de solo do Brasil**. Disponível em: http://mapbiomas.org/pages/database/mapbiomas_collection. Acesso em: 20 jan. 2019.

RAMOS, R. R. D. **Aplicação do Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving (SAFER) para a cana-de-açúcar no submédio do Vale do São Francisco Brasil**. 2018. 61 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, 2018.

REIS, J. B. R. S.; JESUS, A. M.; DIAS, M. S. C.; CASTRICINI, A.; DIAS, J. R. Efeito de lâminas de irrigação e doses de pbz na póscolheita da mangueira cv. Haden no norte de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 5, n. 3, p. 214–224, 30 set. 2011.

RIBEIRO, K.; SOUSA-NETO, E. R.; CARVALHO, J. A.; SOUSA LIMA, J. R.; MENEZES, R. S. C.; DUARTE-NETO, P. J.; DA SILVA GUERRA, G.; OMETTO, J. P. H. B. Land cover changes and greenhouse gas emissions in two different soil covers in the Brazilian Caatinga. **Science of The Total Environment**, v. 571, p. 1048–1057, nov. 2016.

RIBEIRO, M. C. M.; BAIARDI, A. Benefícios do sistema de produção integrada na fruticultura (PIF) em perímetros irrigados: o caso do polo Petrolina/Juazeiro. **Revista Economica do Nordeste**, v. 47, n. 1, p. 21–38, 2016.

RUNNING, S.; MU, Q.; ZHAO, M. **MOD17A2H MODIS/Terra gross primary productivity 8-Day L4 global 500m SIN grid V006 [Data set]**. 2015.

Disponível em: <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/products/evapotranspiration/MOD17A2H/>.

RUNNING, S.; MU, Q.; ZHAO, M. **MOD16A2 MODIS/Terra Net evapotranspiration 8-Day L4 global 500m SIN grid V006 [Data set]**. 2015.

Disponível em: <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/products/evapotranspiration/MOD16A2/>.

RUNNING, S. W.; THORNTON, P. E.; NEMANI, R.; GLASSY, J. M. Global terrestrial gross and net primary productivity from the Earth observing system. In: SALA, O.E.; JACKSON, R. B.; MOONEY, H. A.; HOWARTH, R. W. (Eds.). **Methods in ecosystem science**. New York, NY: Springer New York, 2000. p. 44–57.

SÁ, L. B.; CUNHA, T. J. F.; TEIXEIRA, A. H. C.; ANGELOTTI, F.; DRUMOND,

M. A. Processos de desertificação no semiárido brasileiro. In: SÁ, L. B.; DA SILVA, P. C. G. (Eds.). **Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010. p. 127–158.

SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M.; SILVA, A. M.; BRASIL NETO, R. M. Estimation of evapotranspiration for different land covers in a Brazilian semi-arid region: a case study of the Brígida River basin, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 74, p. 54–66, 2017.

SCHAAF, C. B.; GAO, F.; STRAHLER, A. H.; LUCHT, W.; LI, X.; TSANG, T.; STRUGNELL, N. C.; ZHANG, X.; JIN, Y.; MULLER, J. P.; LEWIS, P.; BARNESLEY, M.; HOBSON, P.; DISNEY, M.; ROBERTS, G.; DUNDERDALE, M.; DOLL, C.; D'ENTREMONT, R. P.; HU, B.; LIANG, S.; PRIVETTE, J. L.; ROY, D. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1/2, p. 135–148, nov. 2002.

SCHAAF, C. B.; WANG, Z. **MCD43A4 MODIS/Terra+Aqua BRDF/Albedo Nadir BRDF adjusted ref daily L3 global - 500m V006 [Data set]**. 2015.

Disponível em: <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/products/brdf-and-albedo/MCD43A4/>.

SILVA, B. B.; GALVÍNCIO, J. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MACHADO, C. C. C.; OLIVEIRA, L. M. M.; MOURA, M. S. B. Determinação por sensoriamento remoto da produtividade primária bruta do perímetro irrigado São Gonçalo - PB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 1, p. 57–64, mar. 2013.

SILVA, B. B.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C.; OLIVEIRA, L. M. M.;
MONTENEGRO, S. M. G. L.; BARBOSA JUNIOR, B. Procedures for calculation
of the albedo with OLI-Landsat 8 images: application to the Brazilian semi-arid.
Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 20, n. 1, p. 3–8,
jan. 2016.

SILVA, P. F.; LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, R.; SOUZA, E. S.;
SILVA, J. R. I.; ALVES, E. M. Seasonal patterns of carbon dioxide, water and
energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil.
Journal of Arid Environments, v. 147, p. 71–82, dez. 2017.

SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; VIEIRA, V. J.
S.; JÚNIOR, W. G. F. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-
de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia
Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 1, p. 64–71, jan. 2012.

SOUZA, L. S. B.; MOURA, M. S. B.; SEDIYAMA, G. C.; SILVA, T. G. F.
Balanço de energia e controle biofísico da evapotranspiração na Caatinga em
condições de seca intensa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 8, p.
627–636, ago. 2015.

SOUZA, L. S. B.; MOURA, M. S. B.; SEDIYAMA, G. C.; SILVA, T. G. F. Carbon
exchange in a Caatinga area during an unusually drought year. **Agrometeoros**,
v. 25, n. 1, p. 37–45, 29 nov. 2018.

STERLING, S. M.; DUCHARNE, A.; POLCHER, J. The impact of global land-
cover change on the terrestrial water cycle. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 4,

p. 385–390, 14 abr. 2013.

SU, Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 6, n. 1, p. 85–99, 2002.

SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE - SUDENE.

Nova delimitação Semiárido. 2018. Disponível em:

<http://sudene.gov.br/images/arquivos/semiarido/arquivos/Relação_de_Municípios_Semiárido.pdf>.

SUR, C.; CHOI, M. Evaluating ecohydrological impacts of vegetation activities on climatological perspectives using MODIS gross primary productivity and evapotranspiration products at korean regional flux network site. **Remote Sensing**, v. 5, n. 5, p. 2534–2553, 2013.

TAN, K. P.; KANNIAH, K. D.; CRACKNELL, A. P. A review of remote sensing based productivity models and their suitability for studying oil palm productivity in tropical regions. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, v. 36, n. 5, p. 655–679, 31 out. 2012.

TANG, X.; LI, H.; DESAI, A. R.; NAGY, Z.; LUO, J.; KOLB, T. E.; OLIOSO, A.; XU, X.; YAO, L.; KUTSCH, W.; PILEGAARD, K.; KÖSTNER, B.; AMMANN, C. How is water-use efficiency of terrestrial ecosystems distributed and changing on Earth? **Scientific Reports**, v. 4, n. 1, p. 7483, 15 maio 2015.

TASUMI, M. **Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery**. 2003. 379. Thesis (Doctor) -

University of Idaho, Moscow, 2003.

TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; AHMAD, M. D.; BOS, M. G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil. Part B: application to the regional scale. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 3–4, p. 477–490, 2009.

TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSEN, W. G. M. MOURA, M. S. B.; SOARES, J. M.; AHMAD, M. D.; BOS, M.G. Energy and water balance measurements for water productivity analysis in irrigated mango trees, Northeast Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 10, p. 1524–1537, set. 2008a.

TEIXEIRA, A. H. C. **Informações agrometeorológicas do Polo Petrolina, PE/Juazeiro, BA - 1963 a 2009**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010.

TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; BASSOI, L. H. Crop water parameters of irrigated wine and table grapes to support water productivity analysis in the São Francisco river basin, Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 94, n. 1/3, p. 31–42, dez. 2007.

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

TREZZA, R. **Evapotranspiration using a satellite-based surface energy**

balance with standardized ground control. 2002. 247p. Thesis (Doctor in Biological and Agricultural Engineering) - Utah State University, Logan, 2002.

TURNER, D. P.; RITTS, W. D.; STYLES, J. M.; YANG, Z.; COHEN, W. B.; LAW, B. E.; THORNTON, P. E. A diagnostic carbon flux model to monitor the effects of disturbance and interannual variation in climate on regional NEP.

Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, v. 58, n. 5, p. 476–490, 18 jan. 2006.

UNITED NATIONS CONVENTION TO COMBAT DESERTIFICATION

(UNCCD). **The convention:** part 1. Disponível em:

<<http://www.unccd.int/en/about-theconvention/Pages/Text-Part-I.aspx>>. Acesso em: 28 jan. 2019.

UNIVERSITY OF MASSACHUSETTS BOSTON (UMB). **MODIS user tools.**

Disponível em:

<https://www.umb.edu/spectralmass/terra_aqua_modis/modis_user_tools>.

Acesso em: 30 set. 2018.

VANIKIOTIS, T.; STAGAKIS, S.; KYPARISSIS, A. **Effects of satellite spatial resolution on gross primary productivity estimation through light use efficiency modeling.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON REMOTE SENSING AND GEOINFORMATION OF THE ENVIRONMENT (RSCy2018),

16., 2018. **Proceedings...** SPIE, 2018. Disponível em:

<<https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10773/2326605/Effects-of-satellite-spatial-resolution-on-gross-primary-productivity-estimation/10.1117/12.2326605.full>>.

VASCONCELOS SOBRINHO, J. **Desertificação no nordeste do Brasil.**

Recife: UFRPE, 2002.

VEROUSTRAETE, F.; SABBE, H.; EERENS, H. Estimation of carbon mass fluxes over Europe using the C-Fix model and Euroflux data. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 3, p. 376–399, dez. 2002.

WAN, Z.; HULLEY, G. **MOD11A1 MODIS/Terra Land surface temperature/emissivity daily L3 global 1km SIN Grid V006 [Data set].** 2015.

Disponível em:

<https://gcmd.nasa.gov/KeywordSearch/Metadata.do?Portal=amd&KeywordPath=Locations%7CGEOGRAPHIC+REGION%7CGLOBAL&OrigMetadataNode=GCMD&EntryId=MOD11A15&MetadataView=Full&MetadataType=0&lnode=mdl b3>.

WANG, Z.; SCHAAF, C. B.; SUN, Q.; SHUAI, Y.; ROMÁN, M. O. Capturing rapid land surface dynamics with Collection V006 MODIS BRDF/NBAR/Albedo (MCD43) products. **Remote Sensing of Environment**, v. 207, p. 50–64, mar. 2018.

WHITE, M. A.; THORNTON, P. E.; RUNNING, S. W.; NEMANI, R. R.

Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME–BGC terrestrial ecosystem model: net primary production controls. **Earth Interactions**, v. 4, n. 3, p. 1–85, jan. 2000.

WILCOXON, F. Individual comparisons of grouped data by ranking methods.

Journal of Economic Entomology, v. 39, n. 2, p. 269–270, 1 abr. 1946.

WOLF, S.; EUGSTER, W.; POTVIN, C.; TURNER, B. L.; BUCHMANN, N.
Carbon sequestration potential of tropical pasture compared with afforestation
in Panama. **Global Change Biology**, v. 17, n. 9, p. 2763–2780, set. 2011.

WOODWELL, G. M.; MACKENZIE, F. T.; HOUGHTON, R. A.; APPS, M.;
GORHAM, E.; DAVIDSON, E. Biotic feedbacks in the warming of the Earth.
Climatic Change, v. 40, n. 3–4, p. 495–518, 1998.

XIAO, X.; BOLES, S.; LIU, J.; ZHUANG, D.; LIU, M. Characterization of forest
types in Northeastern China, using multi-temporal SPOT-4 VEGETATION
sensor data. **Remote Sensing of Environment**, v. 82, n. 2–3, p. 335–348, out.
2002.

XIAO, X.; HOLLINGER, D.; ABER, J.; GOLTZ, M.; DAVIDSON, E. A.; ZHANG,
Q.; MOORE, B. Satellite-based modeling of gross primary production in an
evergreen needleleaf forest. **Remote Sensing of Environment**, v. 89, n. 4, p.
519–534, fev. 2004.

YAN, K.; PARK, T.; YAN, G.; LIU, Z.; YANG, B.; CHEN, C.; NEMANI, R.;
KNYAZIKHIN, Y.; MYNENI, R. Evaluation of MODIS LAI/FPAR product
collection 6: part 2: validation and intercomparison. **Remote Sensing**, v. 8, n. 6,
p. 460, 30 maio 2016.

YANG, Y.; SHANG, S.; GUAN, H.; JIANG, L. A novel algorithm to assess gross
primary production for terrestrial ecosystems from MODIS imagery. **Journal of
Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 118, n. 2, p. 590–605, jun. 2013.

YARABRASIL. **Princípios Agronômicos da Cana-de-Açúcar**. Disponível em:

<<https://www.yarabrasil.com.br/nutricao-de-plantas/cana-de-acucar/>>. Acesso em: 20 abr. 2016.

YU, G.; SONG, X.; WANG, Q.; LIU, Y.; GUAN, D.; YAN, J.; SUN, X.; ZHANG, L.; WEN, X. Water-use efficiency of forest ecosystems in eastern China and its relations to climatic variables. **New Phytologist**, v. 177, n. 4, p. 927–937, mar. 2008.

YUAN, W.; LIU, S.; YU, G.; BONNEFOND, J. M.; CHEN, J.; DAVIS, K.; DESAI, A. R.; GOLDSTEIN, A. H.; GIANELLE, D.; ROSSI, F.; SUYKER, A. E.; VERMA, S. B. Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 7, p. 1416–1431, jul. 2010.

ZELHUBER, A.; SIQUEIRA, R. Rio São Francisco em descaminho: degradação e revitalização. **Revista Crítica de Humanidades**, v. 227, 2007.

Disponível em:

<https://cadernosdoceas.ucsal.br/index.php/cadernosdoceas/article/view/124/10>
[4](#).

ZHANG, L.; TIAN, J.; HE, H.; REN, X.; SUN, X.; YU, GUIRUI; L., Q.; LV, L. Evaluation of water use efficiency derived from MODIS products against Eddy variance measurements in China. **Remote Sensing**, v. 7, n. 9, p. 11183–11201, 31 ago. 2015.

ZHAO, M.; HEINSCH, F. A.; NEMANI, R. R.; RUNNING, S. W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. **Remote**

Sensing of Environment, v. 95, n. 2, p. 164–176, mar. 2005.

ZHUANG, Q.; WU, B. Estimating evapotranspiration from an improved two-source energy balance model using ASTER satellite imagery. **Water**, v. 7, n. 12, p. 6673–6688, 26 nov. 2015.