



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de
Recursos Hídricos

Arthur Moreira de Abreu

**Modelagem Numérica e Sensoriamento Remoto: Um estudo para a
caracterização hidrológica e estimativa de vazões na bacia hidrográfica do Alto
Paraguai**

Rio de Janeiro

2021

Arthur Moreira de Abreu

**Modelagem Numérica e Sensoriamento Remoto: Um estudo para a
caracterização hidrológica e estimativa de vazões na bacia hidrográfica do Alto
Paraguai**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA), na Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Instrumentos da Política de Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Lúcio Silva de Souza

Coorientador: Dr. Daniel Medeiros Moreira

Rio de Janeiro

2021

DEDICATÓRIA

Primeiramente a meus pais, Ângela e Adilson, pois sem eles eu não teria condições de trilhar meu próprio caminho, sempre me apoiando e incentivando a crescer. À minha esposa Flávia que me ajudou muito, sempre incentivando e me acompanhou nas muitas noites em claro durante as atividades da minha tese. E a meus irmãos Renato e Yasmim que também me incentivaram e torceram pela minha conquista.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Lúcio Silva de Souza por toda a atenção dada aos meus questionamentos e dúvidas, sempre disponível para conversar e orientar de uma forma que me sempre me passou bastante segurança em continuar o que eu estava fazendo.

Ao meu coorientador, Daniel Medeiros Moreira, que também tenho o prazer de ser colega de trabalho no SGB/CPRM e me incentivou desde sempre a fazer o mestrado. Passou muitas e muitas horas comigo até mesmo nos fins de semana, principalmente em videoconferências e telefonemas para me ajudar nas dúvidas e orientações durante a minha pesquisa.

À minha colega de trabalho Ana Carolina Costi, que entendeu desde o início a minha necessidade de conciliar o trabalho com o mestrado, e foi muito parceira nessa caminhada.

Ao chefe do Departamento de Hidrologia da CPRM, Frederico Cláudio Peixinho, por possibilitar minha liberação para realizar o curso.

Também ao colega de trabalho Carlos Eduardo Sacramento, que me ajudou bastante na elaboração de alguns mapas, sempre disponível a auxiliar.

A Janaína Gomes Pires da Silva, que desde que nos conhecemos no SGB/CPRM me incentivou a fazer o mestrado. Uma grande colega e guerreira, muito querida dentro do Departamento.

A todos os meus colegas de trabalho do Departamento de Hidrologia pelo incentivo e ajuda.

A Prof. Friedrich pelo apoio na coordenação desse curso. Sempre disposto a ajudar os alunos. Muito obrigado!

A todos os professores do Prof. Água do polo UERJ, pelas aulas, ensinamentos e até mesmo pelas dicas com relação aos nossos trabalhos de mestrado.

Aos colegas de turma da “2018”, com quem passamos tantos momentos bons e divertidos. Foram pessoas especiais que de alguma forma fizeram a diferença uns para os outros.

Aos professores Francisco Dourado e Enio Pereira de Souza, que aceitaram o convite para compor a minha banca e ajudaram demais com suas observações e sugestões.

À secretária do ProfÁgua do polo UERJ, Ana Beatriz, pela ajuda em todas as etapas do curso, que juntamente com o Fred, formam uma boa equipe que ajudam demais os alunos.

Ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) pelo apoio técnico científico oferecido, e a ANA e a CAPES pelo apoio ao ProfÁgua vez que o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas (ANA) através do Projeto CAPES/ANA AUXPE No. 2717/2015.

Por fim, agradeço à empresa SGB/CPRM – Serviço Geológico do Brasil – pelo apoio técnico, financeiro e sua infraestrutura.

RESUMO

ABREU, Arthur Moreira de. **Modelagem Numérica e Sensoriamento Remoto**: Um estudo para a caracterização hidrológica e estimativa de vazões na bacia hidrográfica do Alto Paraguai. 2021. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos), Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

Nos últimos anos a bacia do Alto Paraguai vem sofrendo com diversos eventos hidrológicos extremos de seca e cheia, causando diversos prejuízos na esfera econômica e social. Para tentar prever com antecedência e entender melhor os fenômenos hidrológicos, o Brasil conta com a Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN). Essa dissertação tem como objetivo oferecer informações úteis para o monitoramento de cheias e secas e para gestão de recursos hídricos, sendo propostos o uso de dados de sensoriamento remoto e modelagem hidrológica como ferramentas que possam auxiliar nesse propósito, além de fazer uma avaliação dos dados hidrológicos obtidos na rede de estações convencionais existentes na bacia do Alto Paraguai. O modelo SMAP foi aplicado a bacia do Alto Paraguai visando contribuir com a gestão da bacia hidrográfica associada, valendo-se de estimativas de precipitação por sensoriamento remoto (CHIRPS e MERGE). Adicionalmente o SMAP foi complementado com dados de evapotranspiração do modelo SSEBop. Os dados utilizados no estudo foram do intervalo de 2003 a 2018 por ser um período comum de disponibilidade dessas informações de sensoriamento remoto. As simulações com o SMAP nessa configuração mostraram-se efetivas na simulação do regime hidrológico da área de estudo e mostraram ainda que o SMAP se inicializado com os sistemas remotos descritos apresentam bons resultados, com correlações elevadas (citar o valor) e resultados do coeficiente *Nash-Sutcliffe* de até 0,82 nas bacias de menor extensão da região, sendo 1 o melhor valor para esse coeficiente. Neste trabalho foi possível atestar a contribuição positiva na gestão da Bacia através do uso do modelo SMAP para esse fim. A simulação hidrológica também apresentou valores similares a modelos mais complexos. No contexto geral, os dados de sensoriamento remoto apresentaram grande efetividade como ferramenta de simulação hidrológica da bacia, auxiliando a gestão e o monitoramento, prestando auxílio à escassez de informações em uma bacia transfronteiriça como a bacia do Alto Paraguai.

Palavras-chave: Hidrologia; Alerta Hidrológico; Sensoriamento Remoto

ABSTRACT

ABREU, Arthur Moreira de. **Numerical Modeling and Remote Sensing**: A study for the hydrological characterization and flow estimation in the Upper Paraguay river basin. 2021. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos), Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

In recent years, the Upper Paraguay basin has been suffering from several extreme hydrological events of drought and flood, causing several damages in the economic and social sphere. To try to predict in advance and better understand hydrological phenomena, Brazil has the National Hydrometeorological Network (RHN). This dissertation aims to provide useful information for monitoring floods and droughts, and for managing water resources, proposing the use of remote sensing data and hydrological modeling as tools that can assist in this purpose, in addition to making an assessment of hydrological data obtained from the network of existing conventional stations in the Upper Paraguay basin. The SMAP model was applied to the Upper Paraguay basin in order to contribute to the management of the associated river basin, using precipitation estimates by remote sensing (CHIRPS and MERGE). Additionally, the SMAP was complemented with evapotranspiration data from the SSEBop model. The data used in the study ranged from 2003 to 2018 as this is a common period of availability of this remote sensing information. Simulations with the SMAP in this configuration proved to be effective in simulating the hydrological regime of the study area and also showed that the SMAP, if initialized with the remote systems described, present good results, with high correlations and results of the Nash-Sutcliffe efficiency of up to 0.82 in the region's smaller basins, with 1 being the best value for this coefficient. In this work, it was possible to attest the positive contribution to the management of the Basin through the use of the SMAP model for this purpose. The hydrological simulation also presented values similar to more complex models. In the general context, remote sensing data showed great effectiveness as a hydrological simulation tool for the basin, aiding management and monitoring, helping the scarcity of information in a transboundary basin such as the Upper Paraguay basin.

Keywords: Hydrology; Hydrological Alert; Remote sensing

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de Pluviômetro	19
Figura 2: Estação Fluviométrica “Blumenau” - Código ANA 83800002.....	21
Figura 3: Estação Fluviométrica “Divisa de Anitapólis” – Código ANA 84520000.	22
Figura 4: Técnicos em Hidrologia realizando uma medição de vazão com equipamento acústico	23
Figura 5: Usina hidrelétrica de Itaipu	24
Figura 6: Distribuição das estações da RHN no Brasil.....	27
Figura 7: Série de satélites LANDSAT	29
Figura 8: Exemplos de imagens de cor da água registradas sensores remotos orbitais a bordo de satélites.	30
Figura 9: - Componentes instrumentais do TRMM.....	32
Figura 10: Satélites da constelação GPM	33
Figura 11: Estrutura do Modelo Smap diário	40
Figura 12: Localização da bacia do Alto Paraguai e área de drenagem da estação fluviométrica de Porto Murtinho, estação mais a jusante dessa bacia	47
Figura 13: Localização do Pantanal na bacia do Alto Paraguai	50
Figura 14: Mapas com médias mensais de inundação na bacia.....	52
Figura 15: Nível do rio extremamente baixo na estação Porto de São Francisco/MS – 2020	53
Figura 16: Prognóstico dos níveis para a vazante na estação Ladário, no rio Paraguai	54
Figura 17: Mapa de uso e ocupação do solo na bacia do Alto Paraguai.....	55
Figura 18: Localização da bacia do Alto Paraguai e área de drenagem da estação fluviométrica de Cáceres.....	56
Figura 19: Localização da bacia do Alto Paraguai e área de drenagem da estação fluviométrica de Porto Conceição.....	57

Figura 20: Localização da bacia do Alto Paraguai e área de drenagem da estação fluviométrica de São Francisco (Código 66810000)	58
Figura 21: Vazões mensais das estações Fluviométricas no Rio Paraguai nos últimos 20 anos, de montante para jusante	60
Figura 22: Vazões médias mensais das estações Fluviométricas no Rio Paraguai	61
Figura 23: Aplicativo SmapDia/SGB - Entrada de dados	64
Figura 24: Perfis Transversais históricos da estação de Porto da Manga (código 66895000) utilizados para análise e revisão das curvas-chave	66
Figura 25: Exemplo de curva-chave - Estação Porto Murtinho	67
Figura 26: Exemplo de comparação das vazões do Hidroweb com novas vazões calculadas	68
Figura 27: Número de meses avaliados entre o CHIRPs e o pluviômetro em 131 pontos	69
Figura 28: Mediana entre os dados do CHIRPs e de pluviômetros.....	70
Figura 29: Análise geral da raiz do erro médio quadrático (RMSE) entre dados do CHIRPs e dados de pluviômetros	71
Figura 30: Dados do MERGE e de pluviômetros – Mediana das diferenças.....	72
Figura 31: Comparação do CHIRPs com MERGE (Produto INPE) - RMSE	73
Figura 32: Chuva total anual na bacia do Alto Paraguai	74
Figura 33: Evapotranspiração total anual na bacia do Alto Paraguai	75
Figura 34: Médias mensais de Chuva e Evapotranspiração na bacia do Alto Paraguai	76
Figura 35: Médias mensais de Chuva (CHIRPS e MERGE), Evapotranspiração (SEEBop) e Vazão na área de contribuição de Cárceres	77
Figura 36: Médias mensais de Chuva (CHIRPS e MERGE), Evapotranspiração (SEEBop) e Vazão na área de contribuição de Porto Conceição.....	78
Figura 37: Médias mensais de Chuva (CHIRPS e MERGE), Evapotranspiração (SEEBop) e Vazão na área de contribuição de São Francisco	79

Figura 38: Médias mensais de Chuva (CHIRPS e MERGE), Evapotranspiração (SEEBop) e Vazão na área de contribuição de Porto Murtinho.....	80
Figura 39: Resultados da calibração e validação do modelo SMAP utilizando dados MERGE e SSEBop como entradas - Cáceres.....	81
Figura 40: Resultados da calibração e validação do modelo SMAP utilizando dados CHIRPs e SSEBop como entradas - Cáceres.....	82
Figura 41: Resultado da otimização – Porto Conceição.....	83
Figura 42: Resultado da validação - Porto Conceição	84
Figura 43: Resultado da otimização – São Francisco	85
Figura 44: Resultado da otimização - Porto Murtinho	86
Figura 45: Resultado da validação - Porto Murtinho	87
Figura 46: Resultados da calibração dos modelos MGB e SIRIPLAN em estações da bacia do Alto Paraguai.	88
Figura 47: Gráfico comparativo para resultados de Nash	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estações da RHN (ANA) por entidade operadora	16
Tabela 2: Distribuição das estações nas bacias hidrográficas brasileiras	26
Tabela 3: Estações Fluviométricas da bacia do Alto Paraguai (Rio Paraguai).....	48
Tabela 4: Comparação de resultados em diferentes áreas de drenagem	89

LISTA DE SIGLAS

ABRHidro	Associação Brasileira de Recursos Hídricos
ANA	Agência Nacional das Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BAP	Bacia do Alto Paraguai
CAD	Computer Aided Design (Desenho auxiliado por computador)
CAEEB	Companhia Auxiliar de Empresas Elétricas Brasileiras
CEMADEM	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CERES	Cloud and Earth's Radiant Energy System
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CHC	Climate Hazards Center
CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data
CNAEE	Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica
CNES	Centre National d'Études Spatiales (Agência Espacial Francesa)
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DNAE	Departamento Nacional de Águas e Energia
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
DNOCS	Departamento Nacional de Obras contra as Secas
DNPM	Departamento Nacional da Produção Mineral
EPAGRI	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
EROS	Earth Resources Observation and Science
ESRI	Environmental Systems Research Institute
ESA	European Space Agency (Agência Espacial Europeia)
ES	Escoamento Superficial
ET	Evapotranspiração
GDAL	Geospatial Data Abstraction Library (Biblioteca de Abstração de Dados Geoespaciais)
GIEMS	Global Inundation Extent from Multi-Satellites (Extensão de Inundação Global de Múltiplos Satélites)
GPM	Global Precipitation Measurement (Medida Global de Precipitação)
GRIB2	GRIB2 Binary

IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
JAXA	Japan Aerospace eXploration Agency (Agência Japonesa de Exploração Aeroespacial)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMERG	The Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
LIS	Lightning Imaging Sensor
METRIC	Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration
MGB	Modelo Hidrológico para Grandes Bacias
MME	Ministério das Minas e Energia
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MOPSO	Multi-Objective Particle Swarm Optimization
MSS	Multispectral Scanner System (Scanner Multiespectral)
MSWEP	Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NSE	Nash–Sutcliffe Model Efficiency (Coeficiente de Eficiência do Modelo Nash-Sutcliffe)
PCD	Plataformas de Coleta de Dados
PLANFAP	Plano de Formação e Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior
PR	Precipitation Radar
RBV	Return-Beam Vidicon
RHN	Rede Hidrometeorológica Nacional
RHNR	Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência
RMSE	Root Mean Square Error (Raiz do Erro Quadrático Médio)
SACE	Sistema de Alerta de Eventos Críticos
SAFER	Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving
SAR	Superintendência de Administração da Rede Hidrometeorológica
SBRH	Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithm for Land

SEBS	Surface Energy Balance System
SGB	Serviço Geológico do Brasil
SIH	Sistema de Informações Hidrometeorológicas
SMAP	Soil Moisture Accounting Procedure (Procedimento de contabilidade de umidade do solo)
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SSEB	Simplified Surface Energy Balance (Balanço Energético de Superfície Simplificado)
S-SEBI	Simplified Surface Energy Balance Index
SSEBop	Operational Simplified Surface Energy Balance (Balanço de Energia de Superfície Simplificado Operacional)
SR	Sensoriamento Remoto
TIFF	Tagged Image File Format (Formato de arquivo de imagem marcada)
TMI	TRMM Microwave Imager
TSEB	TwoSource Energy Balance
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
USAID	United States Agency for International Development
USGS	United States Geological Survey (Serviço Geológico dos Estados Unidos)
UTM	Universal Transversa de Mercator
VIRS	Visible Infrared Scanner
WMO	World Meteorological Organization (Organização Meteorológica Mundial)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	9
1.1.	Objetivos.....	12
1.1.1.	Objetivos específicos	12
1.2.	Justificativa	13
1.3.	Estrutura do texto	13
2.	HISTÓRICO DA HIDROLOGIA NO BRASIL	14
2.1.	A Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) e sua criação: um breve histórico 15	
2.1.1.	A Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência (RHNR) e sua criação 16	
2.1.2.	Observadores hidrológicos.....	17
2.1.3.	O Monitoramento Hidrometeorológico no Brasil.....	18
2.1.4.	Dificuldades encontradas na operação da RHN.....	22
2.1.5.	Importância da RHN para a gestão dos recursos hídricos	24
3.	REVISÃO DA LITERATURA.....	28
3.1.	Sensoriamento remoto para a hidrologia.....	28
3.1.1.	Dados de sensoriamento remoto para estimativa de precipitação	31
3.1.2.	Dados de sensoriamento remoto para estimativa da evapotranspiração.....	35
3.1.3.	Análise de trabalhos de sensoriamento remoto em hidrologia	36
3.2.	Modelagem hidrológica.....	38
3.2.1.	Modelo SMAP	39
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	45
4.1.	Área de estudo	46
4.1.1.	Avaliação das planícies de inundação na bacia do Alto Paraguai.....	49
4.1.2.	Últimos eventos de estiagem no Pantanal	53

4.1.3. Mapa de uso e cobertura do solo	54
4.2. Estações utilizadas no modelo	55
4.3. Dados hidrometeorológicos adquiridos em campo	58
4.4. Obtenção de dados de satélite	62
4.5. O SmapDia/SGB.....	63
4.5.1. Revisões e ajustes nas curvas-chave e vazões	65
5. RESULTADOS.....	68
5.1. Avaliação dos dados de satélite	69
5.2. Comparação dos resultados do modelo SMAP nas diferentes sub-bacias ..	80
5.2.1. Sub-bacia - Cáceres.....	81
5.2.2. Sub-bacia – Porto Conceição.....	82
5.2.3. Sub-bacia – São Francisco	84
5.2.4. Sub-bacia – Porto Murtinho.....	85
5.3. Comparação dos resultados do modelo SMAP com outros modelos	87
6. CONCLUSÕES E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS.....	91
6.1. Conclusões.....	91
6.2. Proposta de trabalhos futuros.....	94
7. REFERÊNCIAS	96

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, conforme a Lei Federal nº 9.984/2000, o monitoramento hidrológico básico é uma atividade de responsabilidade federal, que visa gerar informações para subsidiar os estudos e projetos que demandam o conhecimento da disponibilidade hídrica e potencial hidráulico das bacias brasileiras. Para atender a essa finalidade, o Brasil possui uma rede hidrometeorológica que é de responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA), e o Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) opera aproximadamente 3.600 estações entre pluviométricas e fluviométricas, que corresponde a cerca de 80% dessa rede hidrometeorológica nacional, conforme informações disponibilizadas no website do SGB/CPRM (<https://www.cprm.gov.br/>).

A operação da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) se dá por meio de instalação, manutenção e coleta de dados de um conjunto de estações distribuídas por todo o país, que fornece dados quantitativos e qualitativos dos rios nacionais, índices pluviométricos e parâmetros climáticos. Com essas estações é possível mensurar o volume de chuvas, a evaporação da água, o nível e a vazão dos rios, a quantidade de sedimentos e a qualidade das águas em estações respectivamente relacionadas: pluviométricas, evaporimétricas, fluviométricas, sedimentométricas e de qualidade da água.

O Brasil é um país que ainda carece de informação hidrológica básica, apesar da quantidade de estações em operação, conforme citado anteriormente. Um exemplo disso é o fato de, atualmente, a rede brasileira ser quatro vezes menos densa do que as redes de países como os Estados Unidos (Moreira, 2010). Sobre as questões de distribuição geográfica, segundo as recomendações da Organização Meteorológica Mundial (WMO, 1994), o Brasil possui uma má distribuição geográfica de estações hidrometeorológicas, principalmente nas regiões Norte e Centro-oeste, a exemplo da bacia Amazônica e bacia do Alto Paraguai que, segundo as normas da WMO, seriam enquadradas em “precariedade monitoradas”.

Essa carência de monitoramento em algumas bacias hidrográficas no Brasil é justificada, em parte, por dificuldades inerentes ao monitoramento hidrológico: alto custo envolvido para operar uma rede hidrometeorológica, acesso restrito a alguns pontos de interesse de monitoramento, com longas distâncias entre as estações e os grandes centros, e ausência de uma rede viária adequada, sendo parte das estações acessada por transporte fluvial e até mesmo por transporte aéreo (Costi, 2012).

A bacia do Alto Paraguai, que é uma bacia transfronteiriça, e está presente tanto no território nacional como também em outros países como Paraguai, Argentina e Bolívia, é um exemplo de que a ausência de informações torna essas questões ainda mais representadas.

Principalmente nestas regiões que fazem fronteira com o Brasil, é muito importante analisar o comportamento das águas para que seja possível realizar as previsões do nível dos rios em pontos de interesse do país, principalmente em períodos de secas e cheias. No entanto, a ausência de informação hidrológica prejudica uma série de trabalhos de engenharia, como alertas de cheias e estudos de potenciais hidráulicos, sendo o aprimoramento do monitoramento hidrológico nas bacias hidrográficas brasileiras de fundamental importância para uma melhor gestão dos recursos hídricos.

Para isso, a tecnologia de sensoriamento remoto pode e tem sido usada para complementar o monitoramento realizado hoje em estações pluviométricas e fluviométricas da RHN medindo os níveis dos rios e a precipitação das chuvas. Alguns trabalhos já avaliaram a eficiência da aplicação de dados de sensoriamento remoto, como Costa (2019) e Oliveira (2018).

Nos últimos anos as tecnologias do sensoriamento remoto vêm se aprimorando, e o uso de satélites nas estimativas de variáveis hidrológicas pode colaborar com o monitoramento hidrológico, aumentando eficiência, representatividade através do aumento de informação, reduzindo custos e possibilitando medir ou estimar variáveis antes não quantificadas (Moreira, 2010).

O sensoriamento remoto é basicamente a utilização da radiação eletromagnética para inferir uma informação sobre a superfície de terra. Não

somente a superfície da terra, mas também a atmosfera e/ou alguma porção da terra. A radiação eletromagnética interage com a atmosfera e a superfície da terra, e essa informação é refletida e captada por um sensor que pode estar em um satélite, ou mesmo algum drone ou avião, conforme visto em Barbosa (2019).

O sensoriamento remoto permite a medição de algumas variáveis hidrológicas importantes como chuva, evapotranspiração, nível altimétrico de corpos d'água e vazão indireta através de modelagem hidrológica, além de ganhos práticos na utilização dessa ferramenta ao medir essas variáveis. O baixo custo é um deles, já que muitos dados de sensoriamento remoto são gratuitos, disponíveis e abertos para toda a comunidade.

As informações obtidas através de monitoramento hidrológico utilizando informações de sensoriamento remoto e redes convencionais podem ser aplicadas como informação de entrada na modelagem hidrológica. Segundo Tucci (1998) um modelo hidrológico é uma ferramenta que permite melhor entender e representar o comportamento de uma bacia hidrográfica e prever condições diferentes daquelas observadas, representando um sistema através de equações matemáticas.

Alguns modelos hidrológicos como o MGB, visto em Collishonn (2007b) e o SMAP em Lopes (1981) têm sido usados com sucesso em diversos estudos como Xavier (2012), Moreira (2010) e Costa (2019). Esses resultados mostraram que a integração de dados de sensoriamento remoto em modelos hidrológicos pode colaborar com a Gestão dos Recursos Hídricos permitindo entender melhor o comportamento hídrico em áreas que possuem redes de monitoramento convencional esparsas.

Esses modelos permitem simular as vazões na bacia do Alto Paraguai utilizando principalmente os dados de chuva e evapotranspiração obtidos através do sensoriamento remoto aliados a dados coletados em campo, permitindo um melhor conhecimento do ciclo hidrológicos nessas regiões.

Embora existam vários estudos e aplicações no mundo inteiro em sensoriamento remoto, dados de satélites aliados a modelagem hidrológica não são amplamente utilizados como ferramenta operacional de monitoramento hidrológico pelos órgãos responsáveis de governo. Geralmente essas instituições responsáveis

ainda procuram buscar melhores avaliações e estudos relacionados a essa tecnologia em instituições acadêmicas, para posteriormente realizarem aplicações piloto no uso dessa ferramenta.

1.1. Objetivos

Baseado na perspectiva de estudos recentes, na escassez de dados e possibilidade de uso complementar de dados de modelagem hidrológica aos dados obtidos em campo, este trabalho tem como objetivo utilizar o sensoriamento remoto como suporte para caracterização hidrológica e estimativa de vazões através de modelagem numérica na bacia do Alto Paraguai utilizando o modelo SMAP, e avaliar sua eficácia nessa região.

1.1.1. Objetivos específicos

- Avaliar e comparar os dados hidrológicos da rede convencional existentes da bacia do Alto Paraguai com produtos de sensoriamento remoto;
- Avaliar os dados de sensoriamento remoto de evapotranspiração e de chuva que estão disponíveis para a bacia do Alto Paraguai e avaliar a qualidade dessas informações;
- Aplicação da modelagem hidrológica da bacia do Alto Paraguai, fazendo uma avaliação e análise dos resultados obtidos;

Desta forma, o presente estudo visa apresentar dois produtos de informação hidrológica baseados em sensoriamento remoto, sendo o primeiro relacionado à evapotranspiração (SEEBop) e o segundo aos dados de chuva (CHIRPS e MERGE), além de mostrar análises das vazões existentes e áreas de inundação na região.

Esses conjuntos de dados serão utilizados na bacia do Alto Paraguai, que é parcialmente monitorada pela rede hidrometeorológica nacional, onde grande parte

desse monitoramento é feito por transporte fluvial, apresentando assim as potencialidades da tecnologia na obtenção de dados hidrometeorológicos.

1.2. Justificativa

Conforme mencionado anteriormente, a bacia do Alto Paraguai tem uma dependência muito grande dos recursos hídricos conforme visto em Tucci e Collishon (2001), principalmente por conta de atividades como produção agrícola, fonte de renda da agropecuária, turismo, transporte fluvial, e vem sofrendo com eventos extremos, e a RHN não consegue atender e suprir a demanda de informação hidrológica.

Neste contexto de informação hidrológica, alguns trabalhos já mostraram a eficiência do sensoriamento remoto no monitoramento hidrológico, como Costa (2019), Moreira e Fassoni Andrade (2018), Moreira (2010), Tucci e Collishonn (2001), apresentando uma oportunidade favorável para desenvolvimento de novos estudos na região do Alto Pantanal fazendo o uso dessa ferramenta.

Aliando esse cenário de escassez de informação hidrológica e novas tecnologias de geração de informação a motivação do presente estudo é apresentar o sensoriamento remoto e em complementaridade a modelagem hidrológica como ferramentas que podem suprir essa carência de informações hidrológicas tão necessárias para a região do Pantanal.

1.3. Estrutura do texto

O trabalho está estruturado em 5 (cinco) capítulos, incluindo o capítulo introdutório, no qual foram apresentados os objetivos e justificativas do trabalho.

No segundo capítulo é feita uma revisão sobre alguns conceitos básicos dentro da hidrologia, a questão do ciclo hidrológico e o comportamento da água no meio ambiente, as distribuições de águas doce através das bacias hidrográficas, o balanço hídrico através dos fluxos de água que entram e saem de uma bacia hidrográfica.

O terceiro capítulo trata da descrição da metodologia aplicada no trabalho, em que estão descritas as informações sobre os dados de satélite para aquisição de informações de chuva, procedimentos para verificação de dados de evapotranspiração e outros dados obtidos com sensoriamento remoto utilizados no trabalho, além de uma revisão de trabalhos que possuem alguma relação com o trabalho proposto, principalmente no que se refere à tecnologia espacial, mostrando outras aplicações do sensoriamento remoto e uso de dados de satélites dentro da hidrologia. Os procedimentos para geração de dados obtidos através de medição de campo também foram colocados, como são feitas as coletas, periodicidade de aquisição desses dados e forma de operação num geral. Para inserir a ferramenta adotada, é feita uma descrição do modelo utilizado nesse estudo, o SMAP. Por fim foram mostradas as estações da bacia utilizadas no modelo.

O quarto capítulo visa mostrar os resultados da caracterização hidrológica, não só em toda bacia do Alto Paraguai, mas também em outras 3 (três) sub-bacias com estações mais a montante do exutório da bacia inteira. Também são mostrados os resultados de precipitação tanto obtidos por sensoriamento remoto quanto os obtidos in loco. Depois são colocadas as comparações entre os produtos obtidos de diferentes formas como: chuva por satélites (através de modelagem) x chuva obtida através dos pluviômetros, chuva de pluviômetros x vazão medida em campo, chuva por satélites x vazão medida em campo, além de outras comparações com os dados utilizados no trabalho, como evapotranspiração.

O quinto capítulo encerra a dissertação informando conclusões gerais para cada dado que foi obtido, além de mostrar os resultados finais nas bacias menores e os resultados na bacia como um todo.

2. HISTÓRICO DA HIDROLOGIA NO BRASIL

Esse capítulo tem como objetivo apresentar a Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) e os procedimentos utilizados para operação e manutenção das estações hidrometeorológicas no Brasil.

2.1. A Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) e sua criação: um breve histórico

Segundo a ANA, o início do monitoramento hidrometeorológico no Brasil teve início ainda nos primeiros anos do século passado quando o Departamento Nacional de Obras contra as Secas (DNOCS) e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) instalaram suas estações mais antigas (<https://arquivos.ana.gov.br/> - "Evolução da Rede Hidrometeorológica Nacional").

Entre 1990 e 2000, surgiram as primeiras estações automáticas com transmissão via satélite (<https://memoria.ana.gov.br/interna/rhn>).

Em 2000, a responsabilidade sobre a RHN foi dada à ANA que, por intermédio da Superintendência de Administração da Rede Hidrometeorológica (SAR), e através de parcerias com várias operadoras distribuídas pelo país, realiza o monitoramento de chuva, nível, vazão, qualidade de água e sedimentos em diversos pontos distribuídos por todo o território nacional.

A RHN é uma parceira da ANA com algumas instituições que coletam os dados, como o Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) que opera aproximadamente 80% dessa rede, conforme a Tabela 1 que mostra a distribuição das operadoras e quantidade de estações operadas por cada uma delas. Esses dados são coletados no campo, são transmitidos via telemetria, ou seja, por satélites, ou também por anotações de vários observadores em campo, são consistidos e transmitidos, para depois serem colocados em um sistema computacional e são disponibilizados para a população pela Internet através do sistema HidroWeb (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb>).

Tabela 1: Estações da RHN (ANA) por entidade operadora

Entidade Operadora	Quantidade	
	Absoluta	%
SGB/CPRM	3686	79,4%
CONSTRUFAM	244	5,3%
AGUASPARANÁ	186	4,0%
EPAGRI-SC	149	3,2%
IGAM-MG	115	2,5%
UFC	79	1,7%
COHIDRO	71	1,5%
AESA-PB	22	0,5%
HOBECO	20	0,4%
IGARN-RN	19	0,4%
APAC-PE	16	0,3%
SEMARH-PI	11	0,2%
INEMA-BA	9	0,2%
DAEE-SP	7	0,2%
ANA	6	0,1%
UNB	4	0,1%
SEMARH-AL	1	0,0%
TOTAL	4645	100%

Fonte: ANA. 21/05/2018

2.1.1. A Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência (RHNR) e sua criação

Em 2016, representantes do SGB/CPRM, ANA e USGS elaboraram um Plano de Implementação da Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência (RHNR) que, a longo prazo, substituirá progressivamente a Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN). A ideia da criação da RHNR teve como motivo principal a característica de ser uma rede de monitoramento para ser operada a um nível de excelência e com tecnologia de última geração, tendo como resultado final a garantia de dados hidrológicos entregues de forma tempestiva, mais confiáveis e representativos, conforme disponibilizado no site do SGB/CPRM (<https://www.cprm.gov.br/>).

A RHNR teve início de sua operação em 2017 com 100 estações em funcionamento naquele ano, e a previsão é que sua expansão se dê paulatinamente, com a implantação de 100 estações/ano nos próximos 10 anos.

Entre os princípios fundamentais da RHNR, destacam-se:

- Coleta e disponibilização de dados seguindo um padrão;
- Acesso aos dados de forma gratuita e com transparência;
- Acessibilidade para uso em curto espaço de tempo;
- Informações arquivadas de forma centralizada para uso futuro;
- Garantia da qualidade do dado;
- Objetividade, imparcialidade e confiabilidade dos dados.

Com o estabelecimento da RHNR, alguns benefícios são esperados como a eficiência da rede de monitoramento por meio da sua otimização. Ainda segundo o SGB/CPRM, a RHNR vem trazendo dados mais tempestivos, confiáveis e precisos, o que pode trazer o aumento de investimentos em pesquisa e desenvolvimento de metodologias, além do reconhecimento público dos benefícios de uma rede de monitoramento (<https://www.cprm.gov.br/>)

Os sistemas de alerta também se beneficiam por meio de respostas mais agilizadas a inundações e estiagens, além de uma melhor disponibilização de dados consistidos e coletados de forma padronizada.

2.1.2. Observadores hidrológicos

Os observadores hidrológicos são os responsáveis por registrar, em cadernetas específicas, as informações diárias relativas às estações hidrometeorológicas (www.ana.gov.br - "Orientações para Operação de Estações Hidrométricas").

Os observadores hidrológicos, de forma geral, são moradores que já fazem esse trabalho há muitos anos, já têm um conhecimento de como conduzir esse processo. A leitura diária das réguas é feita duas vezes ao dia. A primeira leitura é feita na parte de manhã às 07h, e a segunda leitura é feita na parte da tarde, às 17h. Eles fazem uma observação visual dos lances de régua previamente instalada

nos rios onde se encontram as estações hidrometeorológica, analisam onde está a lâmina d'água e fazem as anotações em uma caderneta de campo. Nela são encontrados a própria caligrafia do observador, como seu nome e assinatura. Depois de digitalizadas essas cadernetas são disponibilizadas por meio do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), que é a base para disponibilização das informações sobre águas no Brasil.

Os observadores são figuras extremamente importantes no trabalho da rede de monitoramento. São a base de todo o trabalho pois é através das cotas anotadas por eles que muitos trabalhos são realizados.

2.1.3. O Monitoramento Hidrometeorológico no Brasil

O monitoramento hidrológico é feito através de equipamentos que ajudam a obter informações da chuva e dos rios, conforme pode ser visto em www.cprm.gov.br - "Monitoramento Hidrológico - SGB/CPRM" (2014). Para os dados de chuva são utilizados pluviômetros, que é basicamente um reservatório que possui medidas padrão e que acumula a água das chuvas, possibilitando estimar a quantidade de água que caiu em determinado período.

Figura 1: Exemplo de Pluviômetro



Fonte: <http://www.cgnamidia.com>

Através do acompanhamento dessas medidas ao longo do tempo, é possível saber as médias das chuvas ao longo dos meses e dos anos, auxiliando na identificação de períodos chuvosos e estiagens e avaliar os riscos de secas e inundações. Essa informação é medida em milímetros (mm). Ao se identificar por exemplo uma chuva de 20 (vinte) milímetros em uma hora, isso significa que em média cada 1 (um) metro quadrado de solo recebeu uma quantidade de chuva equivalente a uma camada de 20 milímetros de água, ou seja, o volume de 20 litros.

Para monitorar as águas também existem outros equipamentos que são utilizados, como medidores por efeito doppler, que medem a profundidade do rio e a velocidade da água, e muitos outros instrumentos que medem vazão dos rios, o transporte de sedimentos e a qualidade da água. Em alguns casos esses equipamentos ficam isolados, e em outros estão em conjuntos nas chamadas estações hidrometeorológicas.

Para entender o clima e as chuvas em cada região, é essencial monitorar e registrar esses dados, sendo muito importante para algumas atividades como transporte fluvial, abastecimento público, agricultura, geração de energia e pesquisas científicas.

Com as tecnologias atuais, há também cada vez mais sensores totalmente automatizados funcionando por energia solar e transmitindo os dados via celular, satélite ou rádio. Essas inovações permitem reunir um volume maior de dados de forma instantânea, com precisão e confiabilidade.

O SGB/CPRM é o principal operador da RHN (www.cprm.gov.br - “Rede Hidrometeorológica Nacional”, 2014). A empresa faz as instalações, operações e manutenções à rede básica nacional cuja coordenação é responsabilidade da ANA, conforme já falado anteriormente. Outras empresas também trabalham em parceria com a ANA, como o CEMADEM, EPAGRI, ÁGUASPARANÁ e IGAM, além de empresas privadas, órgãos gestores estaduais e empresas do setor elétrico.

Além disso a ANA também recebe dados de estações no exterior, concentrando as informações em bases de dados. Os dados coletados a cada mês são enviados à ANA e disponibilizados no SNIRH, para serem disponibilizados ao usuário final.

Os equipamentos acústicos de medição de vazão são exemplos de como o trabalho do monitoramento hidrometeorológico vem se otimizando com a modernização dos equipamentos, pois essas medições que antes eram feitas com equipamentos exclusivamente mecânicos como o molinete e que poderiam durar horas, hoje são feitas em minutos com os novos equipamentos (Coelho, 2011). A Figura 2 mostra um exemplo de equipamento acústico utilizado na medição de descarga líquida de uma estação hidrometeorológica.

Figura 2: Estação Fluviométrica “Blumenau” - Código ANA 83800002



Fonte: (ANA, 2012)

As estações fluviométricas com medição de vazão recebem a visita das equipes de campo pelo menos 3 (três) vezes ao ano para obtenção desses dados.

Na Figura 3 é possível ver um exemplo de estação fluviométrica e a sua seção de réguas.

Figura 3: Estação Fluviométrica “Divisa de Anitapólis” – Código ANA 84520000



Fonte: (www.ana.gov.br) – Acesso em 08/12/2020

2.1.4. Dificuldades encontradas na operação da RHN

Na operação da rede hidrometeorológica nacional existem muitas dificuldades enfrentadas pelas equipes de campo, desde problemas com os veículos e equipamentos (Rios et al., 2011), e além disso, o acesso a algumas estações é restrito. Algumas estações exigem muito tempo não só em barcos e carros, mas também em voadeiras, canoas e em algumas situações, até mesmo aviões de pequeno porte.

O serviço pesado também é uma característica desse tipo de atividade, onde é necessária determinada força bruta, como: colocar e retirar barcos de cima das caminhonetes utilizada nas viagens de campo, manuseio de equipamentos pesados e realização de serviços de limpeza das estações como pinturas dos cercados e

estruturas das estações e roças no solo que possuem elevada vegetação (www.ana.gov.br - "Orientações para Operação de Estações Hidrométricas", 2012).

Em algumas regiões do Brasil, para chegar em determinadas estações, é possível se deparar com animais, muitas vezes perigosos, tendo em vista a necessidade de passar próximo ao seu habitat natural (Paca, 2011).

Outros problemas muito comuns encontrados no Brasil, que é um país de tamanho continental, são as variações de clima e vegetação, que em certas ocasiões pode dificultar a chegada dos operadores de campo até as estações; e até mesmo variações culturais, onde muitas vezes é preciso lidar com a população local durante as atividades de monitoramento.

O tempo de operação durante os roteiros também é uma questão importante, pois a operação de rede pode durar semanas e até meses. Como a operação da RHN tem um elevado custo para mobilizar uma equipe de 2 (dois) a 3 (três) operadores de campo (Figura 4), e em determinadas regiões as estações ficam muito distantes uma da outra, não é muito viável mobilizar essa equipe para operar poucas estações, e isso acarreta justamente numa atividade bastante demorada em algumas situações, resultando na necessidade desses profissionais ficarem muito tempo longe de suas residências e de suas famílias.

Figura 4: Técnicos em Hidrologia realizando uma medição de vazão com equipamento acústico



Fonte: www.cprm.gov.br - Acesso em 26/01/2020

2.1.5. Importância da RHN para a gestão dos recursos hídricos

Toda a gestão de recursos hídricos se inicia com a informação gerada através do monitoramento, e um dos principais objetivos do trabalho realizado através da RHN é justamente ter um melhor conhecimento quantitativo e qualitativo da disponibilidade da água, tornando possível a utilização dos recursos hídricos de maneira mais adequada possível (www.ana.gov.br - " Cuidando das águas: soluções para melhorar a qualidade dos recursos hídricos", 2011).

A hidroeletricidade é uma forma de utilização bastante conhecida no país, visto que grande parte da matriz energética do Brasil é baseada em hidroeletricidade (Morais; Barreiros, 2018), utilizando uma quantidade significativa desses recursos hídricos para a geração de energia elétrica através de grandes hidrelétricas como a de Itaipu.

Figura 5: Usina hidrelétrica de Itaipu



Fonte: <http://glo.bo/KVaESu>

Os dados que a RHN fornece servem de base para diversos estudos na área de Engenharia e outras que estão no nosso cotidiano, como abastecimento, obras civis e projetos como alertas de eventos críticos. Esses projetos de alerta têm como objetivo uma melhor convivência da população aos eventos extremos, fornecendo informações referentes ao monitoramento hidrológico das bacias hidrográficas e apresentando a situação dos níveis dos rios e a quantidade de chuva em tempo real. Dessa maneira, esses alertas permitem a elaboração de previsão hidrológica e emissão de boletins de alerta sobre eventos hidrológicos extremos (Germano; Pickbrenner, 2019). Esses dados são importantes tanto para a ANA, quanto para quaisquer instituições que queiram monitorar e gerenciar suas águas.

Os sistemas de alerta dependem de dados bem específicos do regime dos rios, e desconhecer esses rios podem causar muitos danos à população, como danos econômicos e no pior dos casos, com perdas de vidas (Varela, 2003). Fazer a medição correta e ter os dados precisos permitem otimizar esses sistemas de alerta e emissão de avisos prévios à população para que se evite esses tipos de danos. Um exemplo é o Sistema de Alerta de Eventos Críticos (SACE), do SGB/CPRM (www.cprm.gov.br - "SACE - SGB/CPRM", 2020).

Também são fundamentais para o gerenciamento do uso da água e do regime dos recursos hídricos o monitoramento em regiões de baixa disponibilidade como o semiárido brasileiro, possibilitando a distribuição e divisão desse recurso. A rede de monitoramento do Brasil possui áreas de coberturas bem densas em termos de quantidade de pontos de monitoramento e outras menos densas (Tabela 2), porém, além dessa rede, é essencial conhecer o que acontece fora do território brasileiro, tendo em vista a importância de entender a quantidade de água que vêm dos outros países através dos canais fluviais, identificando todos os problemas transfronteiriços, para tomar ações em termos de adaptação e mitigação. O Brasil tem todas as fronteiras fechadas em termos de monitoramento, e em todos os lugares de entradas de rios são feitos o balanço do que entra e o que sai, conforme o site www.cprm.gov.br - "Monitoramento Hidrológico - SGB/CPRM", (2014).

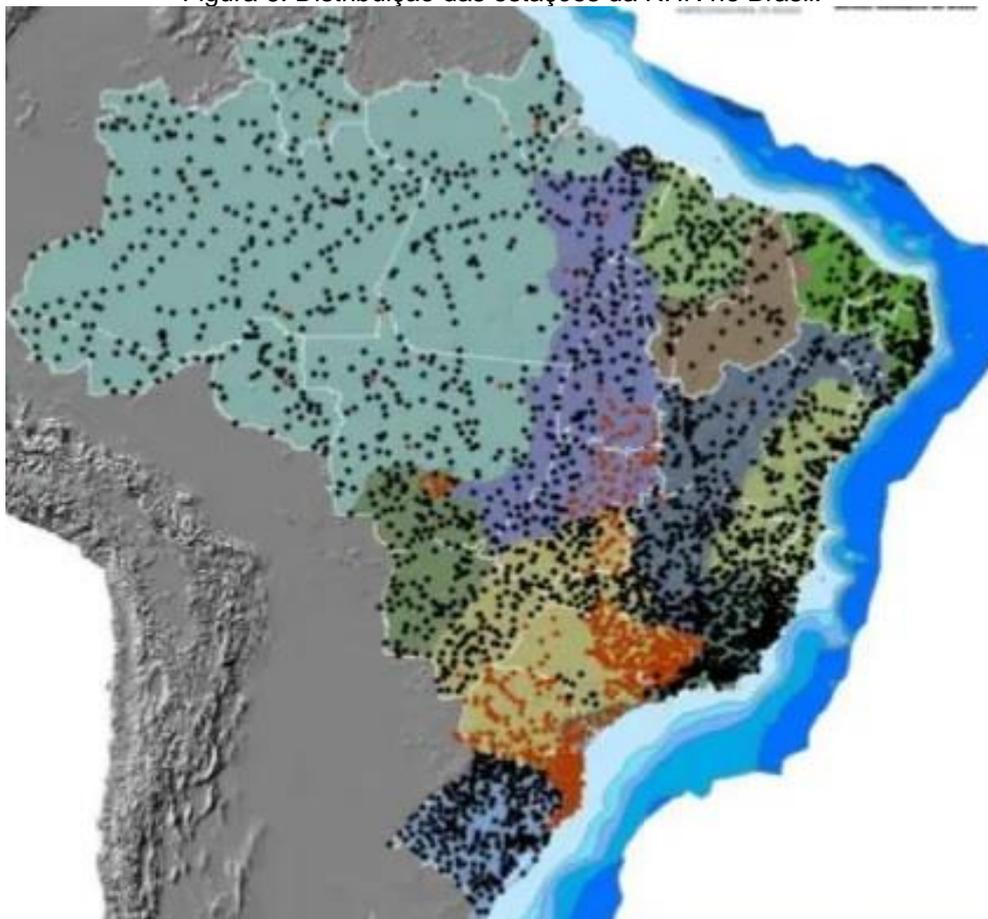
Tabela 2: Distribuição das estações nas bacias hidrográficas brasileiras

Bacias Hidrográficas	Tipos de Estações		
	Fluviométricas	Pluviométricas	Total
RIO AMAZONAS	270	471	741
RIO TOCANTINS	86	188	274
ATLÂNTICO, TRECHO NORTE/NORDESTE	391	386	777
RIO SÃO FRANCISCO	230	337	567
ATLÂNTICO, TRECHO LESTE	344	450	794
RIO PARANÁ	319	527	846
RIO URUGUAI	79	162	241
ATLÂNTICO, TRECHO SUDESTE	154	251	405
TOTAL	1873	2772	4645

Fonte: ANA. 21/05/2018

A seguir na Figura 6, a distribuição espacial das estações da RHN no Brasil, mostrando a falta de monitoramento adequado com grandes áreas sem estações de monitoramento.

Figura 6: Distribuição das estações da RHN no Brasil.



Fonte: www.cprm.gov.br – Acesso em 10/11/2021.

O uso da informação que a RHN gera permite atender as questões do multiuso da água, como as cidades que coletam a água para abastecer as comunidades, os meios de transporte fluviais e a geração de energia. Isso mostra que é necessário que se tenha informações mais discretizadas e efetivas possíveis, pois os tomadores de decisões farão escolhas em cima de um dado concreto, obtido durante uma série histórica de longo prazo.

Uma característica bastante positiva da RHN é a sua continuidade ao longo dos anos, e esse desafio é ainda maior por sermos um país onde normalmente há muita descontinuidade de ações que começam, mas não terminam, e mudanças de governo podem acarretar pausas de projetos que estavam em andamento para começar outros novos. Nesse sentido, existem na RHN estações que funcionam a

mais de 100 anos banco de dados disponível em (banco de dados disponível em <http://www.snirh.gov.br/hidroweb> - "Hidroweb - ANA"), em épocas onde eram outras as instituições responsáveis, e cujo monitoramento é feito até os dias atuais. Até mesmo nas crises financeiras que o país já passou, a RHN conseguiu se sustentar e continuar sua operação.

3. REVISÃO DA LITERATURA

Em sequência serão apresentados conceitos do sensoriamento remoto na hidrologia com alguns exemplos de trabalhos feitos sobre esse assunto e por fim uma abordagem sobre modelagem hidrológica apresentando o modelo SMAP, que foi utilizado na área de estudo da bacia do Alto Paraguai.

3.1. Sensoriamento remoto para a hidrologia

O Sensoriamento Remoto (SR) é basicamente a utilização de imagens de qualquer ponto da superfície terrestre com o objetivo de realizar estudos diversos sobre alvos pré-determinados, como visto em Moreira (2010) e Fassoni-Andrade (2018), e baseia-se no comportamento espectral dos alvos para a obtenção de informações dos mesmos sem o contato físico com estes. Essas imagens são importantes ferramentas para melhor compreender o espaço geográfico, podendo ser utilizado para pesquisas científicas, planejamentos governamentais, além de outros objetivos, como a previsão meteorológica.

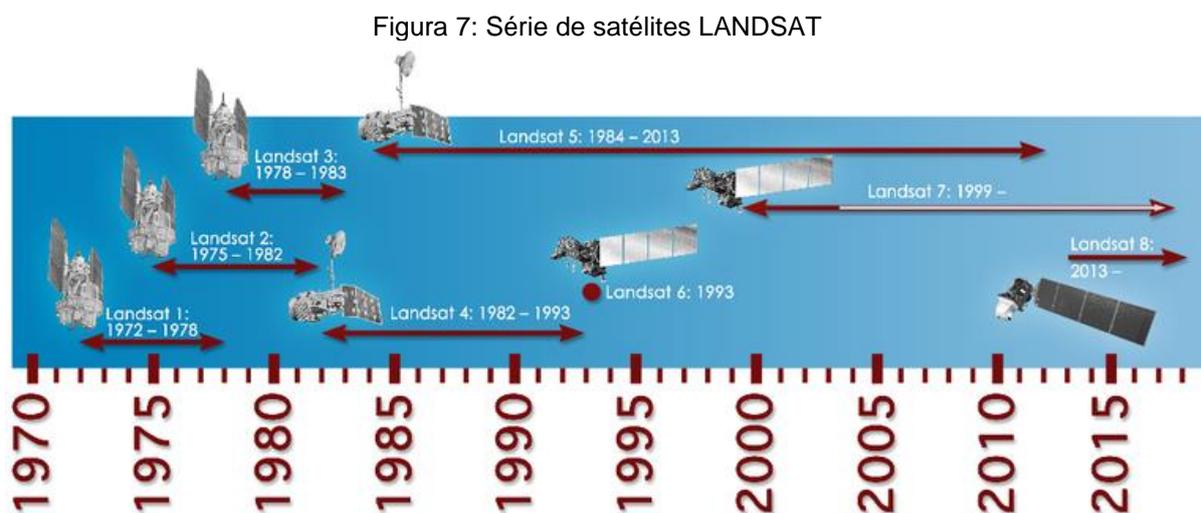
Segundo Barbosa (2019), o Sensoriamento Remoto permite que se obtenham algumas informações na superfície terrestre utilizando radiação eletromagnética. Caracteriza-se por utilizar técnicas que, aliadas com alguns sensores distantes ou remotos, possibilitam o conhecimento dessas informações, que podem ser de alguma área, objeto ou até mesmo algum fenômeno. Esses sensores estão geralmente em satélites, aviões, radares drones, etc.

No caso de imagens adquiridas por sensores localizados a bordo de satélites, esses orbitam a superfície da terra, e ao longo dessa trajetória eles vão coletando

e adquirindo imagens com diferentes níveis de resolução espacial, temporal, radiométrica, espectral, para diferentes finalidades. O sensoriamento remoto orbital é um instrumento de medida indireta, ou seja, não está diretamente capturando uma medida física (Barbosa, 2019).

O sensoriamento remoto orbital produzindo imagens da Terra começa em 1972 com um programa americano da NASA (Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço) denominado ERTS-1 ou LANDSAT-1 (<http://www.dgi.inpe.br/> - "LandSat"). O LANDSAT-1 foi o primeiro satélite de observação da Terra a ser lançado com a intenção expressa de estudar e monitorar o uso e cobertura do solo do nosso planeta utilizando dois instrumentos a bordo, as câmeras RBV e MSS. Sua operação aconteceu por um período de cinco anos, onde foram adquiridas mais de 300.000 imagens, com repetidas coberturas da superfície da Terra.

Desde esse primeiro lançamento até hoje foram lançados 9 satélites da série LANDSAT, sendo o último lançado recentemente no final de setembro de 2021, todos satélites são/foram capazes de produzir imagens multiespectrais da superfície da Terra, conforme Figura 7.



Fonte: (INPE, 2021)

Em nível mundial, a NASA é um dos maiores órgãos que captam imagens de seus satélites. No Brasil, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) é a principal referência institucional que utiliza essa ferramenta.

No monitoramento hidrológico, o sensoriamento remoto tem um papel bastante abrangente, como abordado anteriormente, como capacidade de monitoramento de precipitação, medição indireta da vazão, evapotranspiração entre outros. Tem como objetivo verificar alguns parâmetros de qualidade de água, como matéria orgânica dissolvida, sólidos em suspensão, e através das variações espaciais desses elementos dentro do corpo hídrico, é possível interpretar e determinar o tipo de superfície está sendo analisada por conta da radiação eletromagnética emitida ou refletida por essa superfície, ou mesmo por objetos terrestres.

Na Figura 8 é possível verificar alguns exemplos de imagens registradas por sensores remotos.

Figura 8: Exemplos de imagens de cor da água registradas sensores remotos orbitais a bordo de satélites.



Fonte: (BARBOSA, 2019)

Cada ponto geograficamente identificado que é detectado pelos sensores dos satélites corresponde a uma área denominada “pixel” (picture cell), e esses pontos possuem valores digitais relacionados à intensidade de energia refletida em faixas (bandas) bem definidas do espectro eletromagnético. Banda espectral é o intervalo entre dois comprimentos de onda no espectro eletromagnético (Steffen, 2021).

O sol emite ondas eletromagnéticas que chegam na superfície terrestre, e a interação das ondas com os diferentes materiais encontrados na superfície terrestre possuem interações diferentes, então uma parte dessa onda é refletida e capturada pelos sensores e transformam parte dessa informação num sinal analógico que é transformado num sinal digital, onde será montada numa matriz de números representando a integração de uma relação entre uma certa área e o que foi refletivo (Barbosa, 2019).

Essa técnica de sensoriamento remoto produz mapas topográficos, que representam a dimensão da superfície terrestre, posicionamento, acidentes geográficos, bem como tipos de solos e construções humanas nessa superfície.

3.1.1. Dados de sensoriamento remoto para estimativa de precipitação

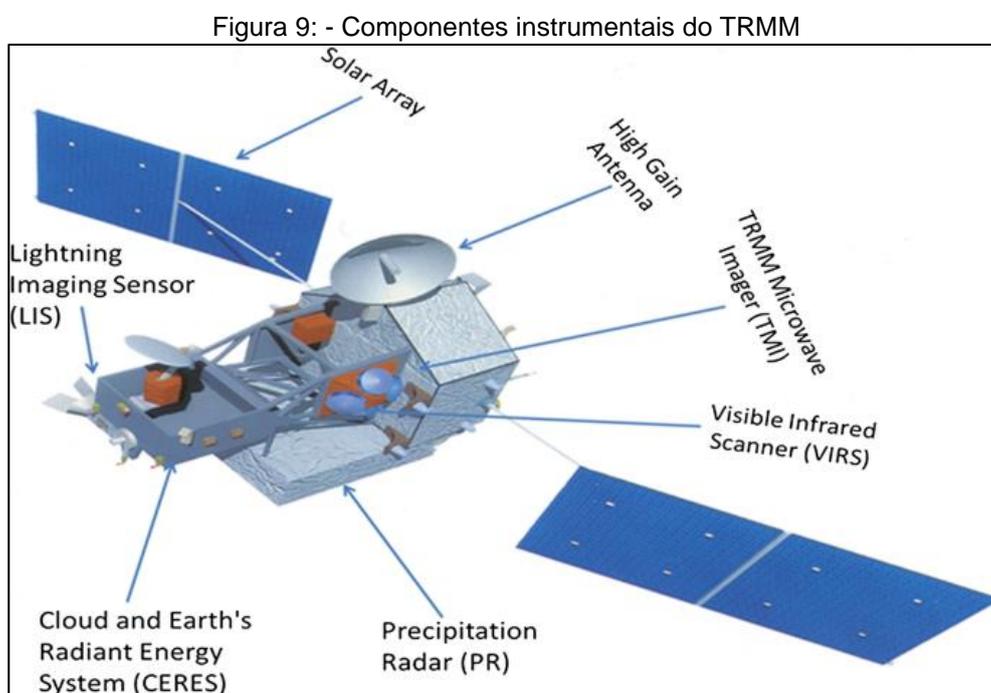
Conforme apresentado no Capítulo 1, convencionalmente os índices pluviométricos são monitorados por pluviômetros instalados ao longo do nosso território. No entanto essa rede é esparsa, com áreas inacessíveis e outras além de fronteira que possuem informações valiosas de águas que drenam para nosso território.

Nos últimos anos os dados de satélites vêm sendo usados para auxiliar na obtenção dessas informações. O satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) foi lançado em 1997 através de uma parceria entre a NASA e a Agência Japonesa de Exploração Aeroespacial (JAXA), com o objetivo de monitorar e estudar a precipitação nos trópicos, e também de analisar a influência que essa precipitação pode influenciar o clima global (Kummerow et al., 2000).

Esse satélite estava previsto para funcionar até 2004, porém em 2001 foi realizada uma manobra de elevação de altitude, e a vida útil do satélite foi estendida devido à economia no consumo de energia (Collischonn, 2006).

O TRMM é constituído por cinco instrumentos básicos, conforme Figura 9: imageador de micro-ondas (TMI), o radar de precipitação (PR), os sensores no visível e infravermelho (VIRS), o sensor para o imageamento de relâmpagos (LIS)

e o sensor de energia radiante e de nuvens (CERES), como mostrado em <https://gpm.nasa.gov/> - "TRMM Instruments".



Fonte: (NASA, 2020)

O TMI (TRMM Microwave Imager) é um radiômetro de micro-ondas passivo multicanal foi projetado para fornecer informações quantitativas sobre a precipitação em uma ampla faixa sob satélite, fornecendo informações sobre o conteúdo de precipitação da coluna integrada, água líquida da nuvem, gelo da nuvem, intensidade da chuva e tipos de chuva (por exemplo, estratiforme ou convectiva).

O PR (Precipitation Radar) foi o primeiro projetado para o monitoramento de chuvas. É um radar de varredura eletrônica operando a 13,8 GHz, que mede a distribuição 3-D de uma tempestade na terra e no oceano e define a profundidade da camada da precipitação.

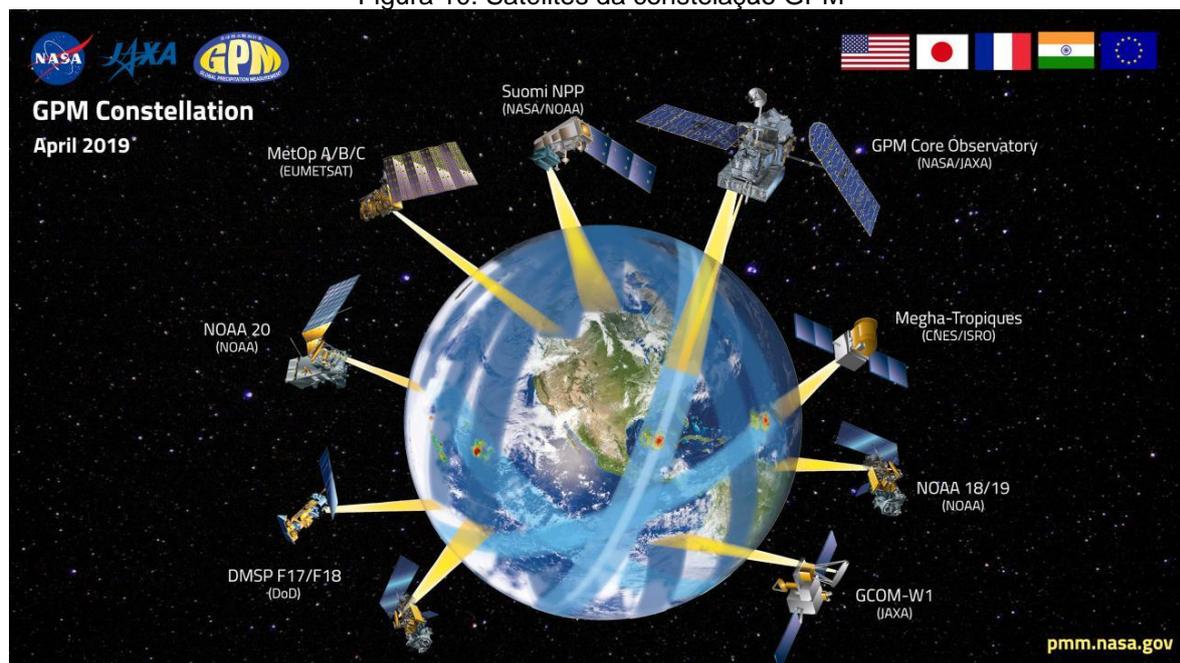
O VIRS (Visible Infrared Scanner) é um radiômetro de varredura que fornece observações de alta resolução sobre a cobertura de nuvens, tipo de nuvem e temperaturas do topo das nuvens.

O LIS (Lightning Imaging Sensor) é um instrumento pequeno e altamente sofisticado que detecta e localiza raios e relâmpagos na região tropical do globo.

O CERES (Cloud and Earth's Radiant Energy System) foi projetado para medir a energia no topo da atmosfera, bem como estimar os níveis de energia na atmosfera e na superfície da Terra.

O adiamento do fim da operação desse satélite mostrou que os resultados foram bastante positivos, conforme ateste de alguns autores como Kummerow et al. (2000) e Flaming (2004), e esse relativo sucesso do TRMM contribuiu para que a NASA preparasse um outro programa para suceder esse anterior, chamado GPM (Global Precipitation Measurement), que constituía basicamente no lançamento de múltiplos satélites com alguns sensores e radares similares ao TRMM, porém com maior resolução (Flaming, 2004).

Figura 10: Satélites da constelação GPM



Fonte: <https://gpm.nasa.gov/missions/GPM/constellation>

A partir desses satélites são produzidos alguns índices globais como o MERGE e CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data), que serão mais detalhados a abaixo, e ambos foram utilizados no trabalho.

O MERGE é um produto gerado e disponibilizado pelo CPTEC/INPE e tem como objetivo fazer a combinação da precipitação observada in loco nas estações pluviométricas com dados resultantes de estimativas feitas por satélite (Rozante et al., 2010). Devido a descontinuidade de dados do satélite TRMM, o MERGE vem sendo gerado utilizando os dados do GPM (Huffman, 2015).

O CHIRPS foi criado em colaboração com cientistas do Centro de Observação e Ciência de Recursos Terrestres do USGS (Earth Resources Observation and Science - EROS) para fornecer conjuntos de dados completos, confiáveis e atualizados para vários objetivos de alerta precoce, como análise de tendências e monitoramento sazonal de secas (Funk et al., 2015).

Desde 1999, os cientistas do USGS e CHC (Climate Hazards Center) - apoiados pelo financiamento da USAID (United States Agency for International Development), NASA e NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) - desenvolveram técnicas para produzir mapas de chuvas, especialmente em áreas onde os dados da superfície são escassos (<https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps/> - 2020)

A estimativa das variações das chuvas no espaço e no tempo é um aspecto essencial do alerta precoce da seca e do monitoramento ambiental. Uma estação em evolução mais seca que o normal deve ser posta em um contexto histórico para que a severidade dos déficits de chuva possa ser avaliada rapidamente. No entanto, as estimativas derivadas de dados de satélite fornecem médias areais que sofrem vieses devido a terrenos complexos, que geralmente subestimam a intensidade de eventos extremos de precipitação. Por outro lado, as redes de precipitação produzidas a partir de dados de estações sofrem em regiões mais rurais, onde há menos estações pluviométricas.

As pesquisas iniciais se concentraram na combinação de modelos de aumento de precipitação induzida por terreno com dados de estações interpoladas. Mais recentemente, novos recursos de observações de satélite, como estimativas de precipitação baseadas em satélites da NASA e NOAA, foram aproveitados para criar climatologias de precipitação em alta resolução (0,05°). Quando aplicadas a campos de precipitação baseados em satélite, essas climatologias aprimoradas

podem remover o viés sistemático - uma técnica essencial na produção do conjunto de dados CHIRPS de 1981 para o quase presente.

Algumas vantagens na utilização de dados de satélite é porque se trata de um produto sem falhas na sua sequência temporal, além de sua alta resolução espacial. Isso que pode ajudar nas análises feitas sobre os impactos causados por eventos extremos de chuva, contribuindo nos casos em que existem ausência de dados por não possuírem estações convencionais.

3.1.2. Dados de sensoriamento remoto para estimativa da evapotranspiração

O processo de evapotranspiração pode ser dividido em duas partes: A evaporação, que é o processo de transferência de água líquida para vapor do ar diretamente da superfície líquidas como lagos, rios, reservatórios, e a transpiração das plantas. Portanto a evaporação e a transpiração fisicamente dizem a respeito ao mesmo fenômeno, que é a mudança de fase da água de líquida para vapor.

Convencionalmente, conforme apresentado no item 2.2, a RHN possui poucas estações climatológicas que fazem as medições desse parâmetro. A exemplo das estações pluviométricas, essas estão em um número muito menor, e nos últimos anos várias tentativas vêm sendo tomadas para auxiliar nesse tipo de informação, através dos dados de satélites.

Os modelos mais complexos se inspiram no balanço de energia na superfície (Allen, 2007), onde a energia disponível da radiação de ondas curtas e longas é equilibrada por fluxos do aquecimento da superfície terrestre e mudanças de fase da água. Para a estimativa do fluxo de calor sensível é necessário o uso de um sensor termal, que mede a temperatura radiométrica da superfície do solo. Essa banda termal permite estimar a temperatura de superfície, que é fundamental para a evapotranspiração (Warren et al., 2014).

Para determinar o balanço de radiação ou balanço de energia dentro do sensoriamento remoto, são utilizados alguns algoritmos, como o **TSEB** (TwoSource Energy Balance), **SEBAL** (Surface Energy Balance Algorithm for Land) proposto por (BASTIAANSEN et al., 1998), **S-SEBI** (Simplified Surface Energy Balance Index),

SEBS (Surface Energy Balance System), **METRIC** (Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration) (Allen, 2007), **SAFER** - Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving (Teixeira, 2012) e o **SSEBop** (Operational Simplified Surface Energy Balance) (Senay et al., 2013).

Para a análise dos dados de Evapotranspiração (ET) nesse estudo foi utilizado o conjunto de modelo operacional do **SSEBop** (Senay et al., 2013) de 2003 até 2018.

A configuração do SSEBop é baseada na abordagem do Balanço Energético de Superfície Simplificado (SSEB) (Senay et al., 2013) com parametrização única para aplicações operacionais. Ele combina as frações de ET geradas a partir de imagens térmicas do sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), que se encontra a bordo dos satélites TERRA e AQUA (<https://www.embrapa.br/> - "Aqua Project Science"), adquiridas a cada 10 dias. A característica principal da parametrização SSEBop é usar condições de fronteira pré-definidas, sazonalmente dinâmicas, que são exclusivas para cada pixel para os pontos de referência "quente / seco" e "frio / úmido". A formulação original do SSEB é baseada nos princípios de pixels quentes e frios dos modelos SEBAL e METRIC.

Os dados do SSEBop foram baixados via código computacional do site do Serviço Geológico Americano (USGS), o produto tem abrangência global, e disponibiliza a informação de evapotranspiração mensal com resolução espacial de 0.01 graus.

3.1.3. Análise de trabalhos de sensoriamento remoto em hidrologia

A utilização de satélites de agências espaciais como a Agência Espacial Americana (National Aeronautics and Space Administration - NASA), Agência Espacial Francesa (Centre National d'Études Spatiales - CNES) e Agência Espacial Europeia (European Space Agency - ESA) para o monitoramento hidrológico vem sendo considerada uma importante ferramenta para coleta de dados, sendo a principal utilização a validação desses dados com os dados coletados em campo (Moreira et al., 2016).

Alguns importantes trabalhos publicados mostram o uso do sensoriamento remoto em estudos de hidrologia.

Em Collischonn et al. (2007a), pode-se ver que foram utilizados dados de chuva baseados em sensoriamento remoto com o satélite TRMM na modelagem do rio Paraguai utilizando modelo hidrológico MGB (Modelo Hidrológico para Grandes Bacias).

Walter Collischonn e Carlos E. M. Tucci mostraram a descrição de um modelo hidrológico para grandes bacias hidrográficas em Tucci; Collischonn (2001), aplicando em duas grandes bacias hidrográficas com distintas características físicas.

Também em Jardim et al. (2020), a utilização de dados de sensoriamento remoto na bacia do Paraguai mostrou que o comportamento hidrológico de uma bacia pode ser bastante interferido quando são verificadas existências de grandes barragens na região. Verificou-se que foi induzida a defasagem de um grande período no armazenamento total calculado pelo modelo justamente devido à operação das grandes usinas hidroelétricas presentes na bacia.

Outro estudo sobre sensoriamento remoto que mostra que o método de medição de superfície com estações pluviométricas locais não é capaz de representar adequadamente a grande variabilidade espaço-temporal do campo pluviométrico, é visto em Souza (2019).

Mais especificamente na bacia do Alto Paraguai, Allasia et al. (2015) mostrou que dados de sensoriamento remoto aliados a modelos hidrológicos são capazes de reproduzir satisfatoriamente hidrogramas em bacias distintas, mostrando-se extremamente útil na previsão de vazões em locais onde não existem dados convencionais.

Os dados de sensoriamento remoto que foram utilizados neste trabalho são os dados de chuva e evapotranspiração, que são os dados de entrada utilizados no modelo matemático SMAP a fim de caracterizar as vazões estimadas.

Nesse trabalho foram utilizados dados mensais de chuva de 2003 até 2018 através das aplicações CHIRPS e MERGE, e também de evapotranspiração através

da aplicação SSEBop. Os conjuntos de dados do CHIRPS, MERGE e SSEBop foram processados e analisados de forma a caracterizar a sazonalidade hidrológica.

3.2. Modelagem hidrológica

Um modelo é basicamente uma representação simplificada de um sistema (Collischonn et al., 2007a), podendo ser utilizado para entendê-lo e tornar possível qualquer tipo de tomada de ação, considerando suposições de cenários, como mudanças climáticas, reflorestamentos, urbanização e eventos extremos. Dessa forma torna possível a otimização da operação desse sistema.

Dentro da hidrologia são utilizados os modelos matemáticos, que são equações ou um conjunto delas que representam um sistema físico.

Os sistemas hidrológicos, como as bacias hidrográficas, são bastante complexos e podem utilizar modelos para diferentes processos dentro do sistema. Esses processos como escoamento superficial em rios, lagos e águas marinhas e escoamento de águas subterrâneas possuem modelos específicos (Tucci; Collischonn, 2001)

Outro tipo de processo que possui modelos hidrológicos específicos são as chuvas e escoamento dentro de uma bacia, onde é possível estimar a propagação desse escoamento conforme o evento acontece. Esse tipo de modelo é interessante por permitir a obtenção de respostas como drenagem e controle de cheias.

No presente estudo, um modelo hidrológico do tipo chuva-vazão, que representa a transformação da chuva em vazão no ciclo hidrológico, cada um dos elementos como reservatórios, sub-bacias, trechos de rios entre outros, podem ser identificados, cada um deles pode ser representado por um conjunto de equações que já foram estudadas anteriormente em hidrologia ou hidráulica.

Essas equações já são conhecidas e podem ser resolvidas por um método numérico. Portanto esses modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão são chamados de modelos numéricos.

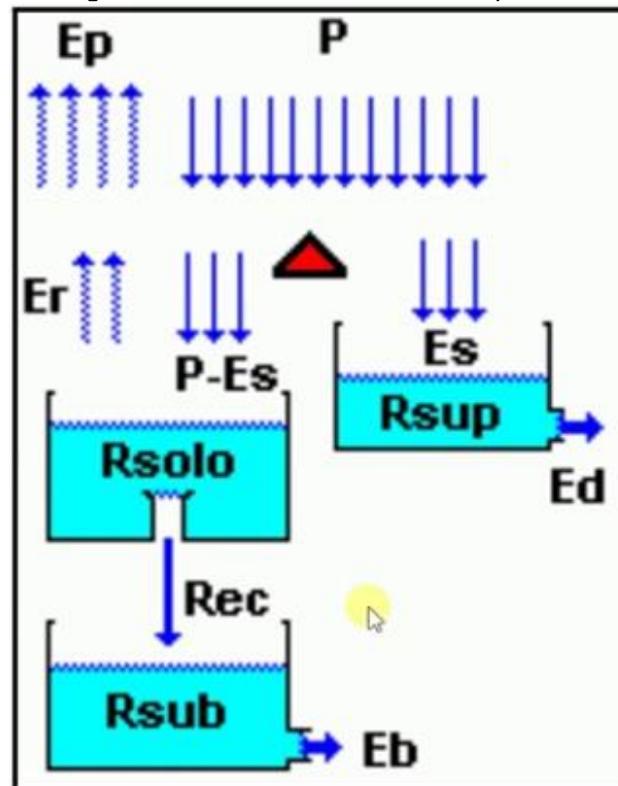
3.2.1. Modelo SMAP

Com esses dados citados anteriormente é possível utilizar o modelo SMAP, que é um modelo matemático para simulação hidrológica de pequenas bacias hidrográficas. Foi proposto por Lopes et al (1981) e se trata de um modelo conceitual concentrado com aplicação generalizada no Brasil, elaborado para representar matematicamente a realidade. Em sua origem tinha como objetivo a modelagem de vazões diárias, porém recebeu uma versão mensal destinada a ser utilizada em estudos de longo prazo.

Em sua versão diária, o modelo SMAP representa os processos hidrológicos a partir de três reservatórios. Um reservatório que representa os processos subsuperficiais, um reservatório que representa os processos subterrâneos e outro reservatório que representa processos ligados ao escoamento superficial direto (Figura 11).

- R_{solo} , ou reservatório superficial do solo (zona aerada);
- R_{sub} , ou reservatório subterrâneo (zona saturada).
- R_{sup} , ou reservatório da superfície da bacia;

Figura 11: Estrutura do Modelo Smap diário



Fonte: USP

Então, na precipitação tem-se o escoamento superficial direto, e uma outra parcela que se infiltra, ficando inicialmente na região não-saturada do solo, representada pelo primeiro reservatório. Esse reservatório vai ter uma retirada de água, associada ao processo de evapotranspiração.

Acima de um certo nível desse reservatório subsuperficial, que seria a capacidade de campo, a água percola profundamente, alimentando o lençol freático (reservatório subterrâneo). Esse reservatório sobe, e sendo um reservatório linear, uma quantidade de água vai para o rio, chamado de escoamento de base.

O terceiro reservatório basicamente representa o processo de translação e de armazenamento da água na superfície da bacia.

Com isso, é possível perceber que esse modelo conceitual representa todos os processos relevantes na bacia de forma simplificada.

Os fluxos entre os reservatórios são:

- P (chuva)
- Es (escoamento superficial)
- Ed (escoamento direto)
- Er (evapotranspiração real)
- Rec (recarga subterrânea)
- Eb (escoamento de base)

Então o modelo SMAP se define em utilizar durante um período comum os dados de chuva e evapotranspiração, que são as duas variáveis de entrada desse modelo, além da vazão que é a variável de saída.

A utilização dessas variáveis aliadas a um ajuste de um conjunto de parâmetros do modelo hidrológico conforme o tamanho dos reservatórios e os fluxos desses reservatórios permite que, dada a precipitação e evapotranspiração, seja possível reproduzir a de vazão estimada. Essa etapa é chamada calibração do modelo.

Após essa etapa, temos a validação do modelo, que visa verificar se a calibração feita anteriormente representa bem ou não o modelo em diferentes períodos.

O critério utilizado para definir a eficácia de um conjunto de parâmetros é a utilização de uma função objetivo, que é uma métrica para saber o quanto o modelo está representando as vazões reais, ou seja, qual a aderência do modelo ao objetivo a ser apresentado. Para esse estudo foi utilizado o índice mais comum na hidrologia, que é o Nash-Sutcliffe, no qual o melhor valor é o mais próximo da unidade.

Essas características fazem com que o modelo seja caracterizado como do tipo concentrado, também denominado como um modelo conceitual. Outra classificação que se pode dar para os modelos hidrológicos são os modelos de base física.

Segundo Lopes et al (1981), modelos conceituais representam os processos hidrológicos, como é o caso do modelo SMAP, a partir de estoques e equações

empíricas que caracterizam o fluxo entre esses reservatórios. O modelo de base física caracteriza os processos hidrológicos a partir das equações de transporte (equações de transporte em massa, equações de transporte de momento e as equações de balanço de energia).

Os parâmetros de calibração utilizados no modelo SMAP são citados nos gráficos de resultados. Os valores desses parâmetros nos resultados de calibração e validação seguem a seguinte ordem:

- str ou capacidade de saturação do solo (mm), é o tamanho do reservatório superficial que gera vazão. Quanto maior esse valor, maior a capacidade do solo de armazenar água na superfície, atrasando o pico de cheia.
- $k2t$ ou coeficiente de recessão do escoamento superficial (dias), que é o tempo que leva para o escoamento superficial diminuir pela metade (50%).
- $crec$ ou coeficiente de recarga da água subterrânea (%), regula a capacidade de distribuição do reservatório do solo.
- ai ou abstração inicial (mm), valor a partir do qual o escoamento superficial é gerado na bacia. Ex.: Uma chuva de 12 mm em 24h, para uma abstração inicial de 9mm, sobram apenas 3 mm para gerar esse escoamento superficial.
- $capc$ ou capacidade de campo (%), interfere no reservatório do solo, regulando a capacidade de evapotranspiração e o fluxo do reservatório do solo para a atmosfera. O dado de evapotranspiração é um dado de entrada no modelo, mas é regulado por esse parâmetro de capacidade de campo.
- kkt ou coeficiente de recessão da água subterrânea (dias), que é o tempo que leva para a vazão de base diminuir pela metade (50%).

Segundo Xavier (2012), no modelo SMAP o teor de umidade do solo controla basicamente o escoamento e recarga profunda, assim como outros modelos conceituais mensais de balanço hídrico. De forma similar à maioria dos modelos conceituais, a umidade equivalente de solo é considerada, no modelo SMAP,

simplesmente como a relação entre o conteúdo total de água na zona vadosa do solo e a capacidade de armazenamento no solo, mais especificamente, em termos da nomenclatura empregada no modelo, pelo quociente entre NSOL e NSAT, respectivamente.

Em sua versão original, o modelo SMAP mensal é composto por dois reservatórios, que representam o armazenamento equivalente nas camadas de solo e dos aquíferos. O primeiro desses reservatórios pode ser visto como uma espécie de reservatório de transição, não produzindo fluxo lateral e sendo responsável pelo controle da geração de escoamento superficial e de recarga profunda, enquanto o segundo assume o papel de reservatório responsável pela produção do componente lento de fluxo associado ao escoamento base.

Os seguintes processos são considerados pelo modelo SMAP: geração de escoamento superficial, evapotranspiração do solo, recarga profunda e escoamento base. Mais especificamente, detalham-se esses processos na sequência, a saber:

- O escoamento superficial (ES) é considerado como sendo proporcional à precipitação (dado de entrada) e à umidade equivalente do solo, através da equação:

$$ES = P \cdot \left(\frac{NSOL}{NSAT} \right)^{ESUP}, \text{ em que } ESUP \text{ (-) é um parâmetro que deve ser definido por calibração;}$$

- A evapotranspiração ER (mm) do solo é dada pelo produto entre a evapotranspiração potencial EP (dados de entrada) e a umidade equivalente do solo segundo:

$$ER = EP \cdot \left(\frac{NSOL}{NSAT} \right)$$

- A recarga profunda REC (mm) a partir do reservatório do solo é proporcional ao teor de água no solo NSOL (mm) e da umidade equivalente do solo através da equação:

$REC = CREC \cdot NSOL \cdot \left(\frac{NSOL}{NSAT}\right)^4$, onde CREC (-) é um parâmetro que deve ser definido por calibração;

- O escoamento base é proporcional ao armazenamento no reservatório profundo:

$EB = NSUB \cdot (1 - KSUB)$, onde KSUB (-) é um parâmetro que pode ser definido a partir de análise de recessão da vazão ou por calibração;

- A vazão total calculada é simplesmente dada por $Q = ES + EB$.

Ainda segundo Xavier (2012), como o modelo SMAP foi originalmente concebido para a simulação de pequenas bacias hidrográficas, existem algumas limitações importantes para a sua aplicação a bacias de médio a grande porte como, por exemplo:

- Ausência do componente de interceptação vegetação - em bacias com densa cobertura de vegetação, portanto, sujeitas à evapotranspiração intensa, essa limitação faz com que uma grande parcela da precipitação esteja disponível para geração de escoamento e infiltração; além disso, rios largos, com leitos secundários e áreas de inundação contíguas são também submetidos a forte evaporação, o que, por sua vez, pode ser considerado como um reservatório de interceptação de superfície;
- Geração de escoamento superficial no próprio passo de tempo, isto é, não há amortecimento ou propagação do escoamento gerado - em bacias pequenas, o volume disponível para geração de escoamento superficial torna-se vazão imediatamente, ou seja, no próprio intervalo de tempo. Essa hipótese não é razoável para grandes bacias hidrográficas, onde o volume de água disponível para o escoamento sofre um atraso devido a algumas razões, tais como a sinuosidade do rio e a existência de leitos secundários, inundados em períodos de cheias, e de várzeas. Além disso, médias e grandes bacias podem ser vistas como compostas por inúmeras sub-bacias

elementares, cada uma tendo um tempo de concentração diferente; desse modo, quanto maior a distância da sub-bacia em relação à seção exutória, maior será o tempo de viagem necessário para que o escoamento gerado na sub-bacia atinja o exutório;

- Modelo concentrado - obviamente, quanto maior a bacia, menor a probabilidade de que um modelo concentrado seja capaz de simular corretamente seu comportamento; existem diversas fontes de heterogeneidade a partir das características da bacia, tais como a cobertura vegetal e os tipos de solo, a precipitação e a evapotranspiração; por outro lado, uma grande bacia tende a atuar como um filtro por meio do qual muitas respostas diferentes, cada sub-bacia elementar sendo tratada como unidade homogênea, são integradas, resultando em uma resposta global, de certa forma, suavizada; entretanto, quando o interesse se concentra apenas no armazenamento médio na bacia e na vazão total na seção exutória, mesmo um modelo concentrado pode ser capaz de fornecer uma resposta aceitável.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Esse Capítulo é dedicado a introduzir a metodologia utilizada para tratar da questão central do estudo, visando apresentar os materiais e métodos utilizados no uso do sensoriamento remoto como suporte para a caracterização hidrológica e estimativa de vazões através de modelagem numérica na bacia do Alto Paraguai.

Serão mostradas as informações referentes aos dados obtidos na Rede Hidrometeorológica Nacional – RHN e a ferramenta utilizada para processar esses dados, mostrando um breve histórico, os desafios e problemáticas, abordando as ferramentas necessárias para baixar e processar os dados dessa rede.

Também serão apresentados o sistema de informações geográficas para delimitar as bacias hidrográficas e os mapas utilizados nesse estudo, o modelo hidrológico utilizado no estudo e também os dados de sensoriamento remoto em

hidrologia, tendo como objetivo avaliar o ganho no uso dessas ferramentas no monitoramento hidrológico nessa bacia.

Os dados de chuva e evapotranspiração obtidos por tecnologias de sensoriamento remoto foram aplicados em sub-regiões da bacia do Alto Paraguai em um modelo hidrológico chamado SMAP - Soil Moisture Accounting Procedure (Lopes et al, 1981), um modelo determinístico, conceitual e concentrado de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão, a exemplo do trabalho de Xavier (2012) que foi realizado na bacia Amazônica, será avaliada a capacidade dessas entradas em simular dados de vazão.

Serão feitas avaliações de estimativas de precipitação por sensoriamento remoto, comparação direta com a rede pluviométrica existente na região, e aplicação dos dados de satélite (ex. chuva e outras fontes) em um modelo hidrológico, para estimar a capacidade de dados de satélite em simularem as vazões nas estações operadas na região do rio Paraguai. Para garantir a melhor calibração desse modelo, foram obtidas em campo novas medições de vazão para aprimorar as curvas chaves já existentes dessas estações.

Por fim, serão apresentados estudos em algumas áreas de drenagem começando pela sub-bacia de Cáceres, que possui uma extensão de aproximadamente 32.000 km², e apresentação de dados para tornar possível a comparação desses dados obtidos entre uma microbacia definida com a bacia em sua totalidade. Pretende-se realizar essas validações ampliando cada vez mais as áreas de estudo, para que finalmente se chegue ao resultado da rodagem do modelo na última estação da bacia do Alto Paraguai, a estação de Porto Murtinho, com cerca de 583.000 km².

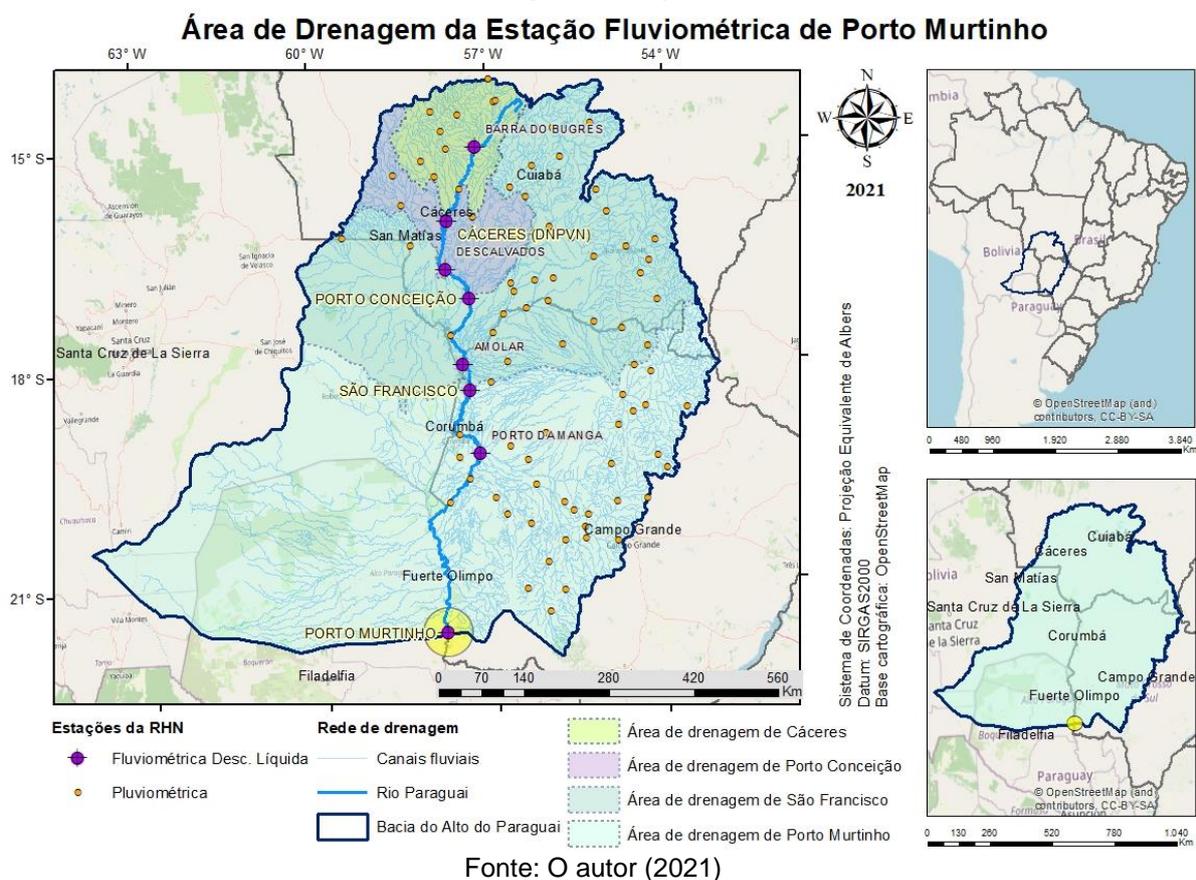
4.1. Área de estudo

No Brasil, a bacia do Alto Paraguai está localizada na região centro-oeste do país, mais precisamente nos estados do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Ela possui cerca de 583.000 km² de extensão, onde cerca de um terço da extensão total está localizada no Brasil, e abrange os biomas do Pantanal (região de planícies) e do Cerrado (região de planaltos). Além do Brasil, ela está presente nos

territórios do Paraguai, da Argentina e da Bolívia (Figura 12). **Fontes:** Cálculos feitos pelo autor em ESRI ArcGIS for Desktop em sua versão 10.6 nos mapas da região e também em (<http://brasildasaguas.com.br/> - "Região Hidrográfica do Paraguai").

A estação fluviométrica mais a jusante da bacia do Alto Paraguai é operada pelo SGB/CPRM, e chama-se Porto Murtinho (código 67100000).

Figura 12: Localização da bacia do Alto Paraguai e área de drenagem da estação fluviométrica de Porto Murtinho, estação mais a jusante dessa bacia



A bacia do Alto Paraguai possui aproximadamente 8 (oito) estações fluviométricas ao longo da sua calha principal, o Rio Paraguai, apresentadas na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3: Estações Fluviométricas da bacia do Alto Paraguai (Rio Paraguai)

Código da Estação	Nome da Estação
66010000	Barra do Bugres
66070004	Cáceres
66090000	Descalvados
66120000	Porto Conceição
66800000	Amolar
66810000	São Francisco
66895000	Porto da Manga
67100000	Porto Murtinho

Fonte: O autor (2020)

Os mapas foram produzidos utilizando o ArcGIs. Para sua composição, diversos dados espaciais foram manipulados. As informações das estações fluviométricas e pluviométricas da região se originaram do banco de dados da RHN.

As áreas de drenagem também foi uma produção desenvolvida de forma manual conforme os dados espaciais da rede de drenagem da região, obtida previamente com no sítio do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

O recorte da bacia do Alto do Paraguai foi obtido a partir de dados espaciais de bacias sob a classificação de Otto Pfafstetter - método que permite a hierarquização da rede hidrográfica - em nível 2 também no sítio do IBGE, assim como os limites das unidades federativas e do território brasileiro. Por fim, os nomes e posições das cidades foram adquiridos pelo programa Google Earth Pro e exportado para ser trabalhado no ArcGIs.

Os dados espaciais que não utilizavam o sistema de referência (datum) SIRGAS2000 foram redefinidos, pois este é padrão nacional adotado atualmente. Houve a necessidade, também, de reprojetar o sistema de coordenadas dos mapas, visto que a área de estudo é extensa e extrapolam os limites dos fusos UTM, sendo assim utilizado a Projeção Equivalente de Albers, uma projeção cônica equivalente com dois paralelos padrões.

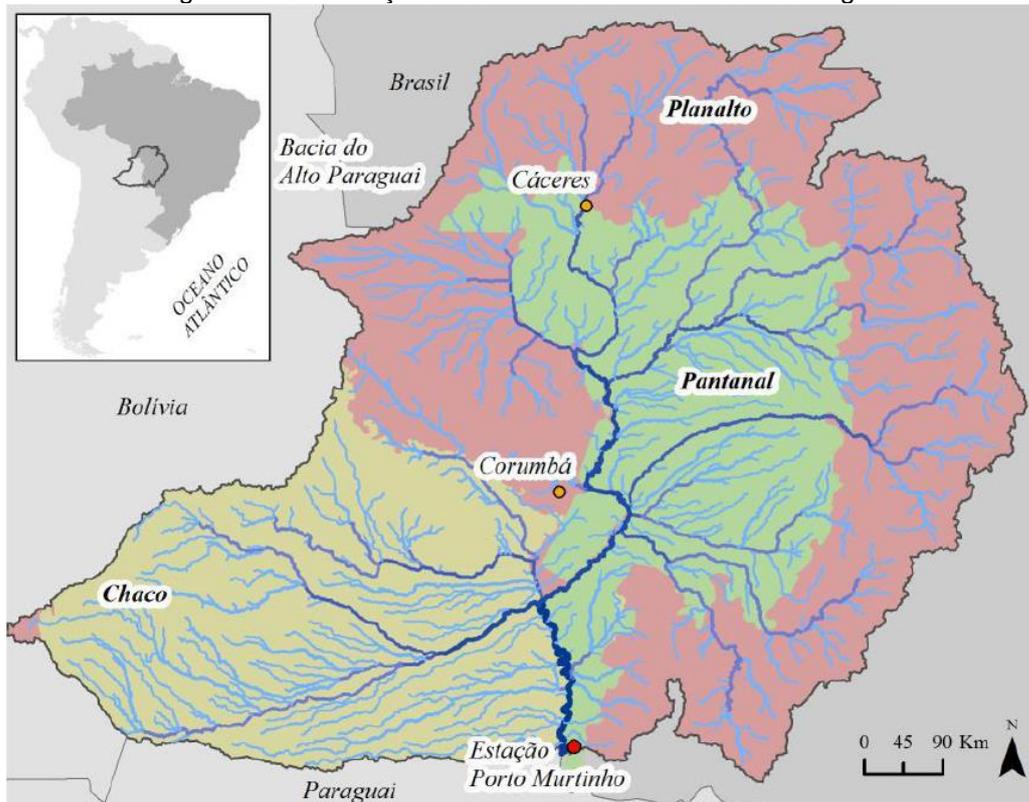
4.1.1. Avaliação das planícies de inundação na bacia do Alto Paraguai

A região do Pantanal possui grande quantidade de planícies de inundação, o que é um fator bastante relevante ao se trabalhar com o modelo SMAP, visto que se trata de um modelo concentrado que tem uma dificuldade na questão de propagação de vazão. Por isso se buscou avaliar as bacias que seriam mais afetadas por essas grandes bacias de inundação.

Na Figura 13 é mostrada a localização do Pantanal na bacia do Alto Paraguai, e suas três regiões distintas: Chaco, Planalto e Pantanal (Tucci, 1999).

A região do Chaco fica localizada a oeste (cor amarela), e tem por característica a baixa precipitação anual. A região do Planalto (cor rosa) possui terras acima de 200 m com chuva anual de 1400 mm e rápida drenagem para a região do Pantanal (cor verde), que fica localizada no centro da bacia e possui drenagem muito lenta devido à baixa declividade, o que contribui para a formação de grandes áreas de inundação.

Figura 13: Localização do Pantanal na bacia do Alto Paraguai



Fonte: (MOREIRA; FASSONI-ANDRADE, 2018)

A região do Pantanal é conhecida por ser a maior planície inundável do mundo. Na época de cheia, os rios do Pantanal extravasam formando uma grande planície inundada, alterando dinâmicas de propagação dos rios e do armazenamento de água na bacia. Essas alterações aumentam a dificuldade da modelagem hidrológica nesse ambiente, pois as relações de cota-vazão em muitos trechos dos rios não são mais diretas, pois para uma mesma cota pode-se ter vazões diferentes conforme a planície esteja enchendo ou vazando, à época.

Para observar a extensão das planícies de inundação contidas na área de estudo, que dificultam a modelagem hidrológica, foi utilizado o produto de sensoriamento remoto chamado GIEMS - Global Inundation Extent from Multi-Satellites (Papa et al., 2010) que é um conjunto de dados baseado em sensoriamento remoto que fornece a extensão da água superficial e dinâmica ao

longo do globo (1995-2015). Esse período tem uma pouca variação com relação ao período do estudo pois trata-se de um produto pronto.

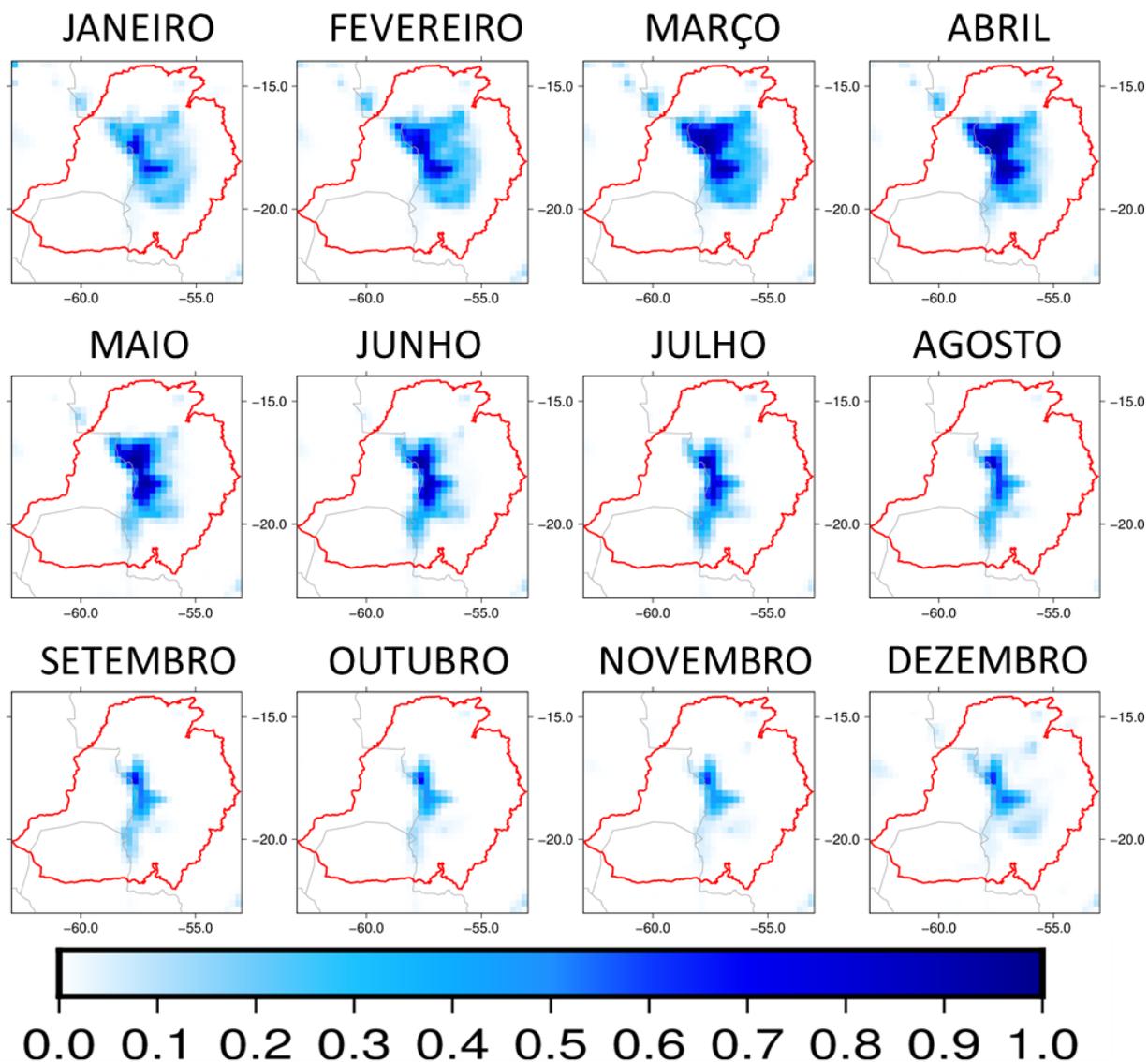
O GIEMS emprega um conjunto de observações de satélite complementares: ele usa medições de micro-ondas passivas e ativas, junto com refletâncias visíveis e infravermelhas próximas. A combinação de observações de diferentes instrumentos torna possível unir forças complementares, extrair o máximo de informações sobre as características da inundação e minimizar problemas relacionados a um único instrumento.

A fração de cada pixel em relação a inundação é estimada em uma grade de área regular (pixels de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ no equador, ou seja, cerca de 28 km x 28 km), em uma escala de tempo mensal. Os dados para a área de estudo podem ser observados na Figura 14, na qual é possível verificar os mapas de inundação na bacia do Alto Paraguai em diferentes épocas – médias mensais.

Como ilustração, esta figura mostra uma fração de inundação e o quanto cada pixel está inundado. Ela mostra que a bacia tem grande armazenamento na parte central. Então essa água que está chovendo não escoar para ter uma relação direta de chuva x vazão, e essas piscinas vão se enchendo dificultando a modelagem que está preparada para estabelecer uma relação mais constante no tempo e espaço com relação à chuva x vazão. Em comparações percentuais, o valor 1 é totalmente inundado.

Figura 14: Mapas com médias mensais de inundação na bacia.

Médias mensais de inundação– 1992-2015



Fonte: O autor (2020)

A partir da Figura 14 pode-se perceber que os meses Fev/Mar/Abr/Mai representam as maiores extensões de inundação da bacia do Alto Paraguai.

É possível verificar que as regiões mais a montante da bacia do Alto Paraguai não sofrem tanto com as planícies de inundação, e isso será mais bem verificado mais para frente na parte de resultados, onde os melhores valores para o modelo foram conseguidos nas estações que ficam nessas regiões menos afetadas.

4.1.2. Últimos eventos de estiagem no Pantanal

Recentemente houve sérios problemas de seca na região do Pantanal. Situações que atingiram seriamente tanto a vida como também a economia da região. Foram várias as atividades que sofreram com esses eventos como a navegação e transportes fluviais, pecuária e criação de outros animais, agricultura, etc. A Figura 15 dá uma ideia dessa ocorrência.

Figura 15: Nível do rio extremamente baixo na estação Porto de São Francisco/MS – 2020

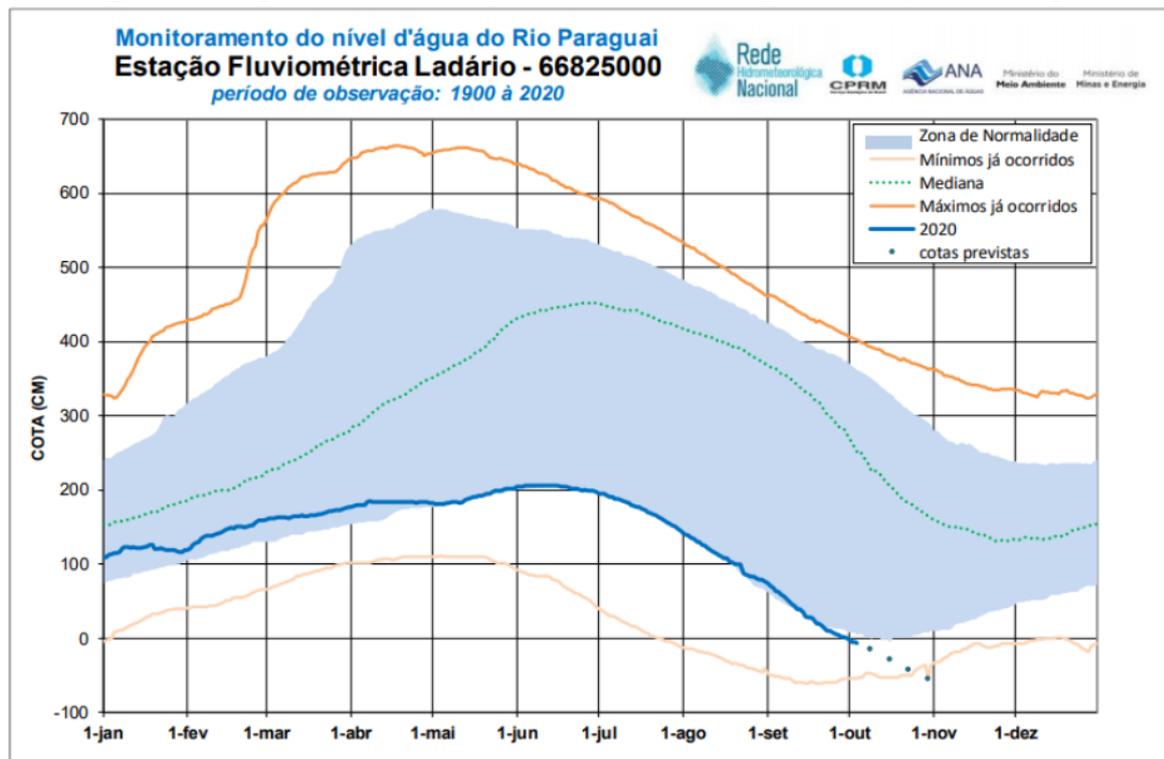


Fonte: O autor (2020)

Durante esse período o SGB/CPRM utilizou dados de satélites para monitorar esses eventos e estimar a diminuição e cessão dessa seca extrema. Essa ferramenta foi fundamental para prever o fim dessa estiagem e utilizar o modelo hidrológico SMAP, identificando cada etapa do evento e estimando a retomada da volta dos níveis do Rio Paraguai.

Na Figura 16 é possível verificar os níveis observados em 2020 na estação Ladário, comparados com os níveis históricos da estação.

Figura 16: Prognóstico dos níveis para a vazante na estação Ladário, no rio Paraguai



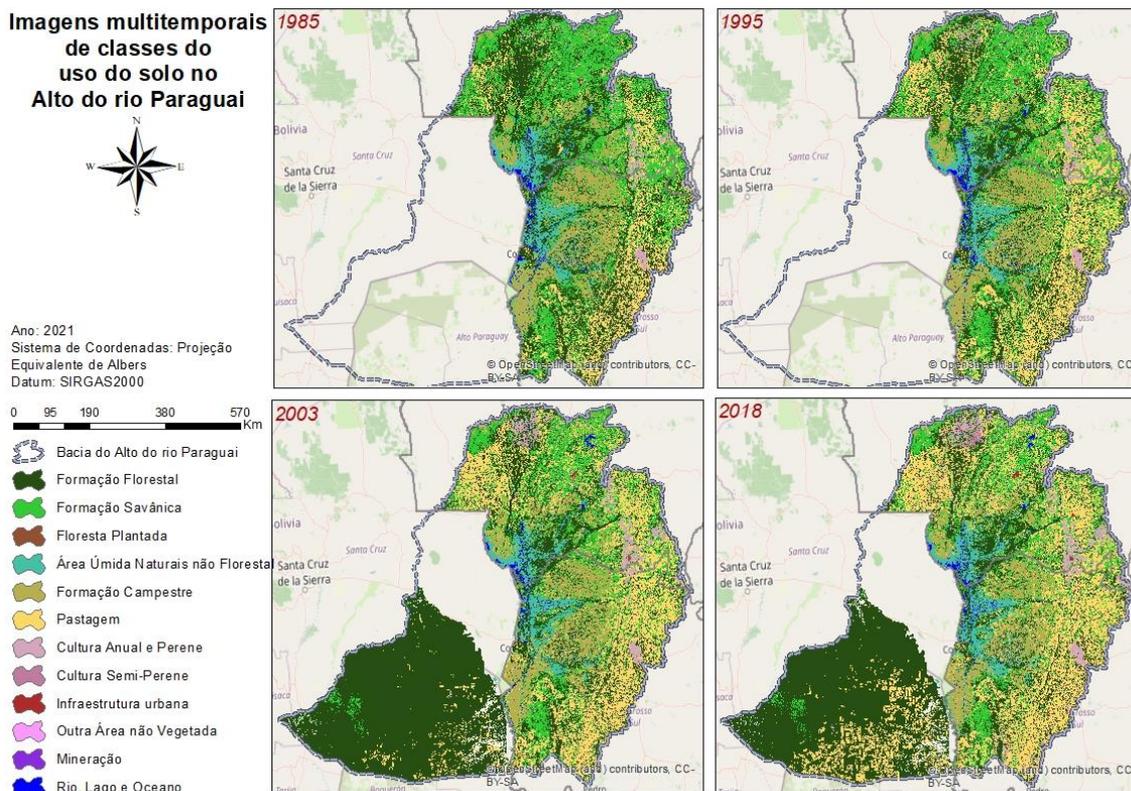
Fonte: SGB/CPRM - "Monitoramento Estiagem no Pantanal - SGB/CPRM" (2020)

4.1.3. Mapa de uso e cobertura do solo

Conforme citado anteriormente no Capítulo 2, o uso do solo pode influenciar na alteração de suas características naturais, alterando as quantidades de água disponíveis e conseqüentemente o comportamento hidrológico de uma bacia. Para melhor ilustrar essas informações, o mapa de uso e cobertura do solo representa o zoneamento em determinadas áreas, mostrando o que pode ser utilizado naquela região da melhor maneira (<https://mapbiomas.org/> - "Análise de Acurácia").

Na Figura 17 são mostrados mapas de uso e ocupação do solo na região da bacia do Alto Paraguai, em que é possível verificar basicamente a diminuição das florestas e aumento de algumas culturas como pastagens e áreas não vegetadas.

Figura 17: Mapa de uso e ocupação do solo na bacia do Alto Paraguai



Fonte: O autor (2021)

Para a geração das imagens comparativas multitemporais foram baixados dados disponibilizados no Mapbiomas Brasil. Foram utilizadas as coleções Brasil 4.1, no qual o primeiro ano de dados é o de 1985, e Chaco 2.0, iniciada a partir de 2000. Infelizmente há áreas sem dados, pois não houve contemplação delas por nenhum projeto.

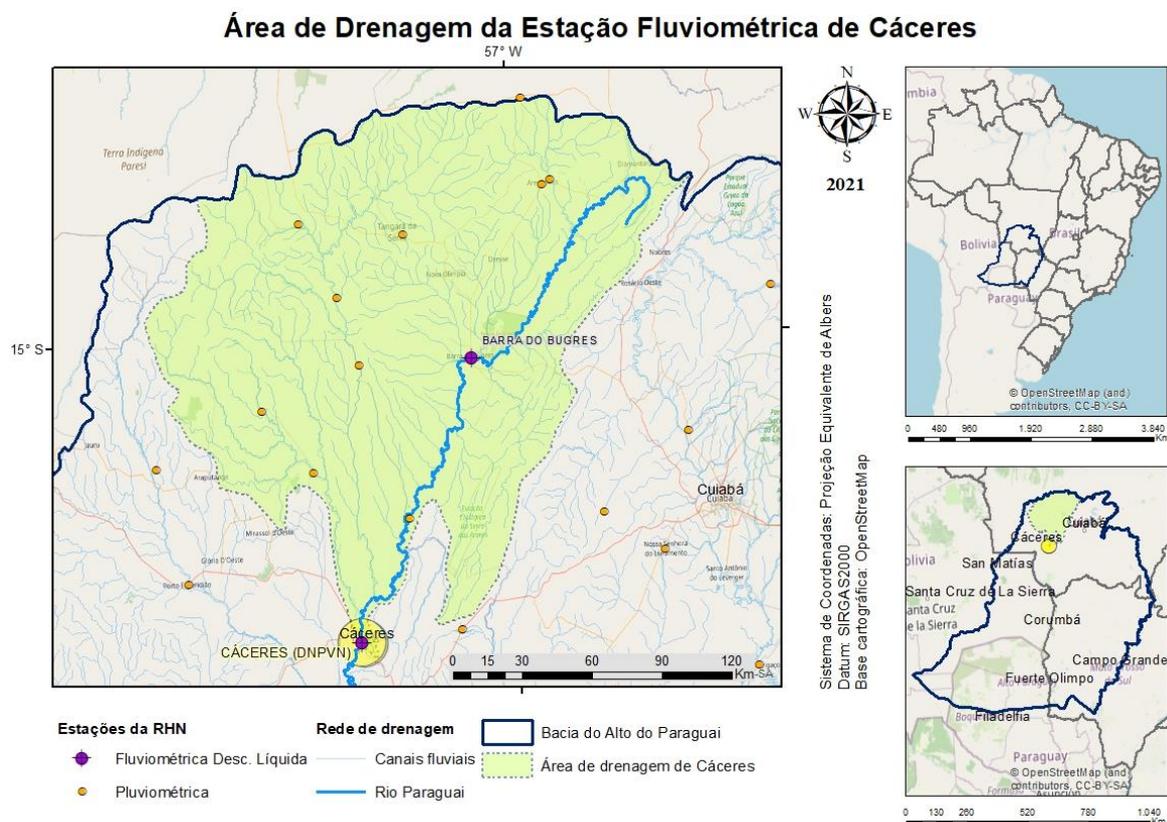
4.2. Estações utilizadas no modelo

Serão utilizados os dados de 4 (quatro) estações para a execução do modelo matemático proposto e simulação de vazões. Todos os dados a seguir foram adquiridos no portal da ANA <https://www.snirh.gov.br/hidroweb>. Para selecionar as estações, foi baixado o inventário e as otobacias também no site da ANA.

A estação fluviométrica mais a montante da bacia utilizada no trabalho é operada pelo Serviço Geológico do Brasil – SGB/CPRM, chamada Cáceres (código 66070004), conforme Figura 18. Possui uma área de aproximadamente 32.000 km² e uma série de vazões calculadas desde 1966. A vazão máxima foi em março/1982, quando foram calculados 2.659 m³/s, e a vazão mínima de 133 m³/s em setembro/1967. O período de cheias ocorre normalmente entre fevereiro e março.

Fonte: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb>.

Figura 18: Localização da bacia do Alto Paraguai e área de drenagem da estação fluviométrica de Cáceres

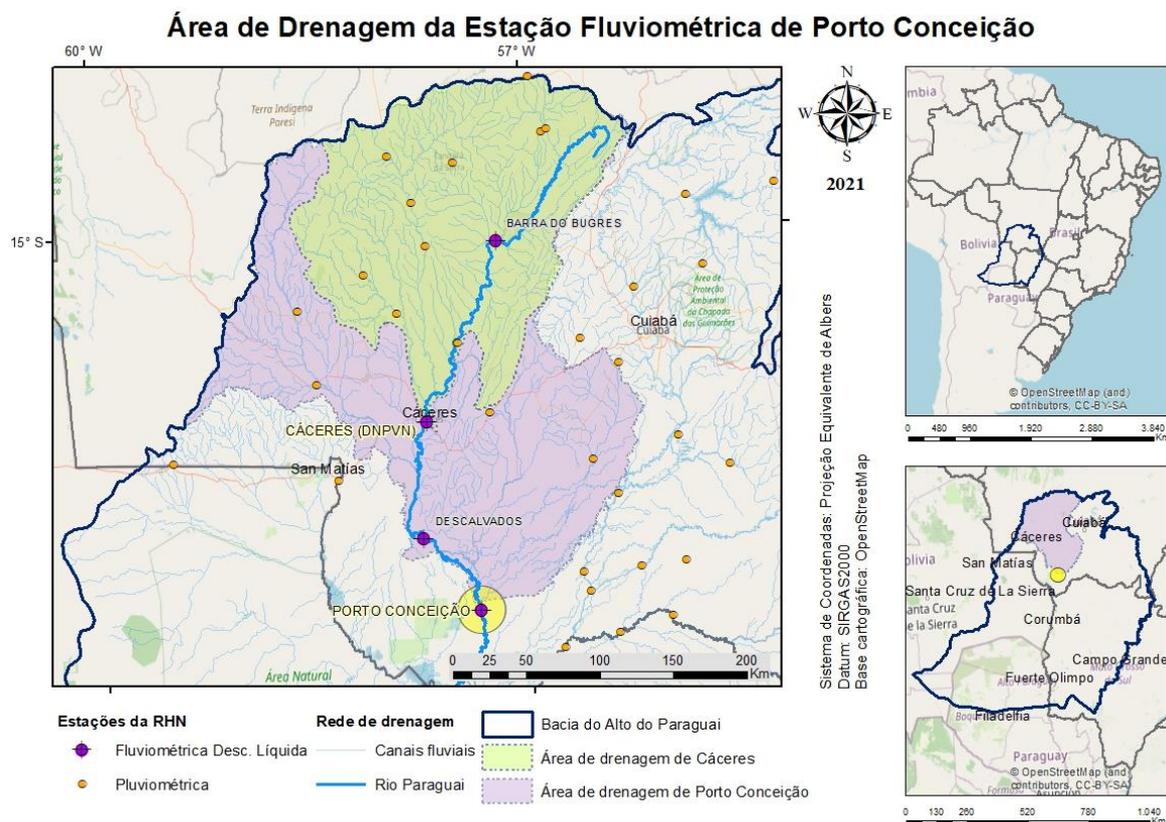


Fonte: O autor (2021)

A segunda estação também é operada pelo Serviço Geológico do Brasil – SGB/CPRM, chamada Porto Conceição (código 66120000), cuja área de drenagem é de aproximadamente 65.000 km² e a série de vazões calculadas tem início em 1968 (Figura 19). A vazão máxima ocorreu em março/1995 quando foram

calculados $873 \text{ m}^3/\text{s}$, e a vazão mínima de $93 \text{ m}^3/\text{s}$ em setembro/1979. Esses valores de vazão serão mais explorados posteriormente, na parte de dados históricos adquiridos em campo.

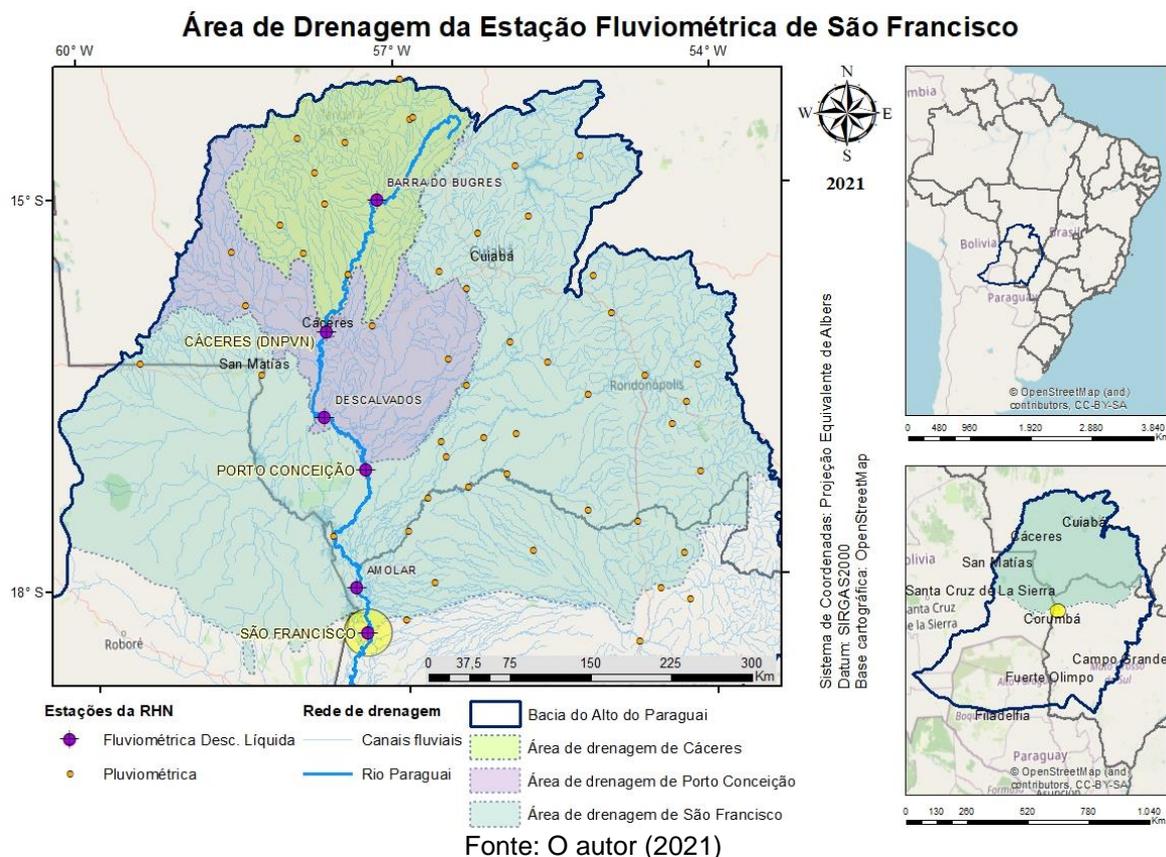
Figura 19: Localização da bacia do Alto Paraguai e área de drenagem da estação fluviométrica de Porto Conceição



Fonte: O autor (2021)

Outra estação fluviométrica operada pelo Serviço Geológico do Brasil – SGB/CPRM é a estação chamada São Francisco (código 66810000) conforme Figura 20. Possui uma área de aproximadamente 245.000 km^2 e uma série de vazões calculadas desde 1967. A vazão máxima foi em abril/1995 quando foram calculados $5.038 \text{ m}^3/\text{s}$, e a vazão mínima de $421 \text{ m}^3/\text{s}$ em setembro/1971.

Figura 20: Localização da bacia do Alto Paraguai e área de drenagem da estação fluviométrica de São Francisco (Código 66810000)



A estação fluviométrica mais a jusante operada pelo Serviço Geológico do Brasil – SGB/CPRM é a estação chamada Porto Murtinho (código 67100000) – Figura 12. Possui uma área de aproximadamente 583.000 km² e uma série de vazões calculadas desde 1939. A vazão máxima foi em junho/1982 quando foram calculados 6.465 m³/s, e a vazão mínima de 545 m³/s em setembro/1971.

4.3. Dados hidrometeorológicos adquiridos em campo

Os dados hidrometeorológicos utilizados no estudo foram obtidos principalmente do HidroWeb (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb>), e a partir disso foi possível analisar e comparar esses dados através das ferramentas, como planilhas eletrônicas, as condições dessas informações como continuidade e lacunas de

dados ausentes, e fazer análises de revisão, que envolve o ajuste de curvas-chave para geração de vazões através das cotas diárias registradas pelos observadores hidrológicos.

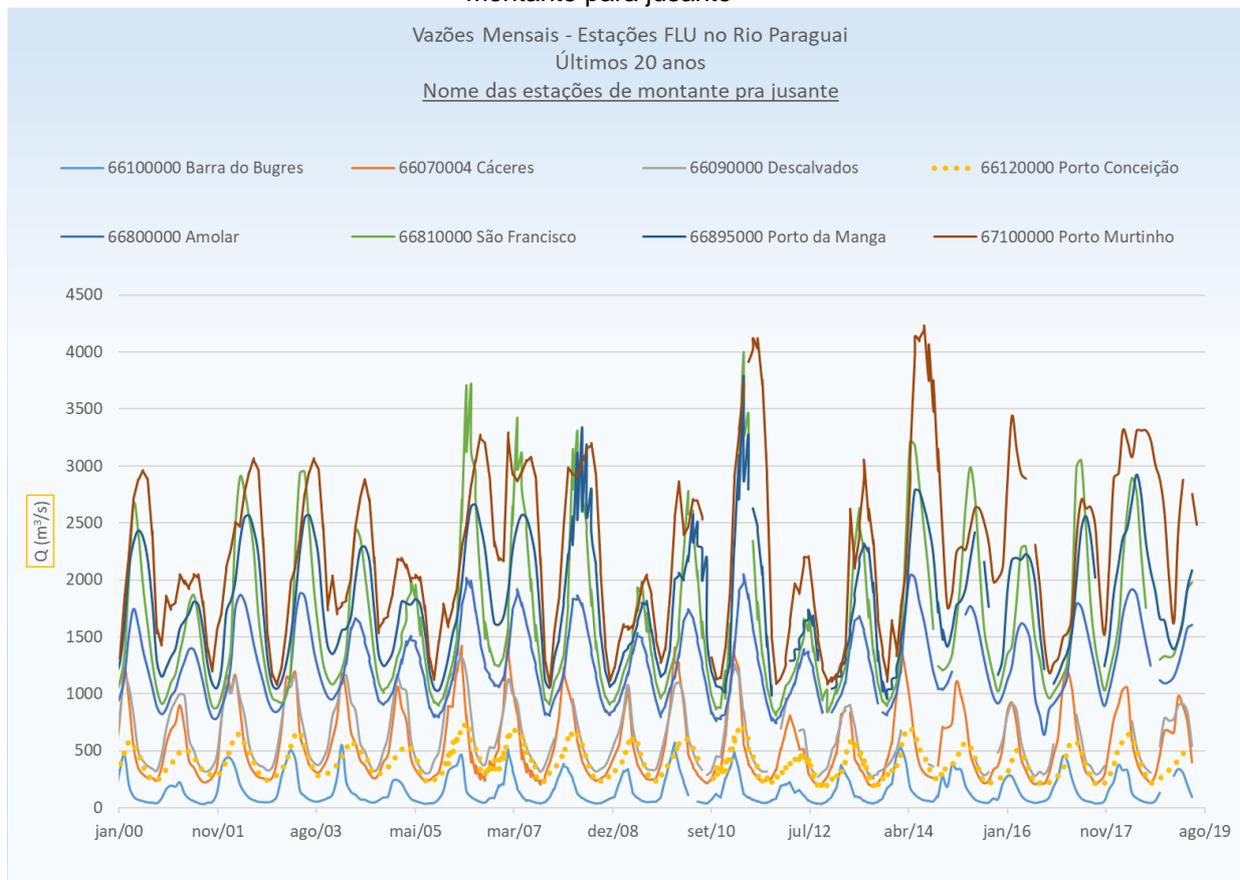
Os principais dados analisados foram cotas, curvas-chave (curva de descarga), medições de vazão in situ, vazão calculada e perfis transversais ou calhas dos rios.

Para esta dissertação serão utilizados basicamente dados da RHN operada no Brasil.

A última estação fluviométrica com medição de vazão na bacia do Alto Paraguai operada pelo Brasil é também uma estação operada pelo SGB/CPRM – Serviço Geológico do Brasil – chamada Porto Murtinho (código 67100000), que possui a área de drenagem de aproximadamente 583.000 km² e que possui uma série de vazões calculadas desde 1939. A vazão máxima foi em Jun/1982 quando se calculou 6.465 m³/s, e a vazão mínima de 631 m³/s em Out/1967. O período de cheias ocorre normalmente entre junho e agosto. **Fonte:** <https://www.snirh.gov.br/hidroweb>.

Na Figura 21 é possível ver o comportamento das vazões mensais dos últimos 20 anos das estações com medição de vazão na bacia do Alto Paraguai.

Figura 21: Vazões mensais das estações Fluviométricas no Rio Paraguai nos últimos 20 anos, de montante para jusante



Fonte: O autor (2020).

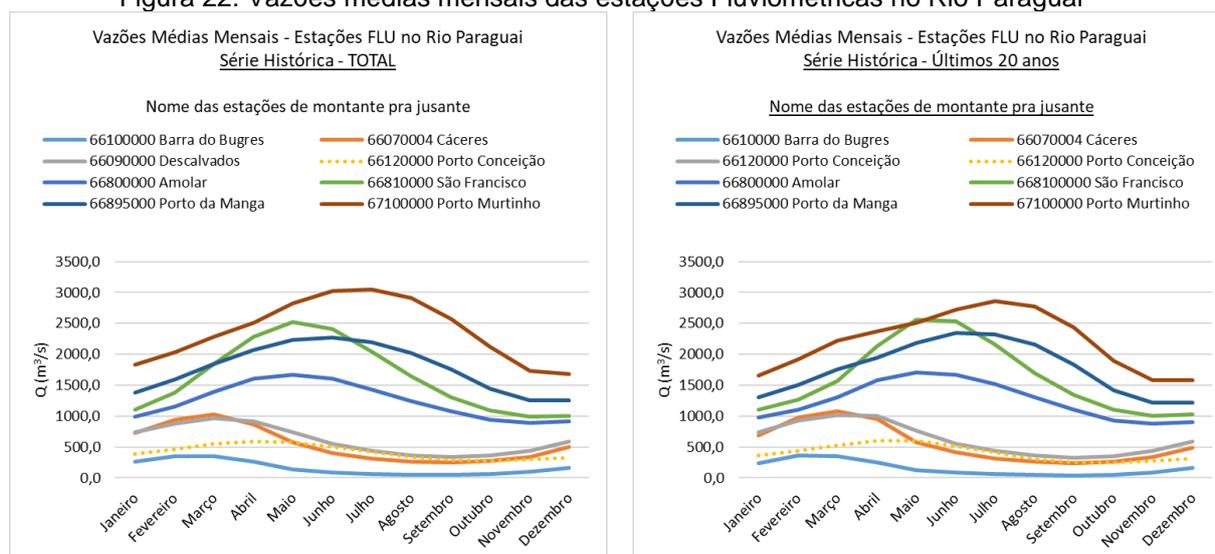
A estação de Porto Conceição (66120000), representada pela curva amarela pontilhada está destacada no gráfico, pois não está acompanhando o padrão de aumento das vazões médias mesmo sendo a quarta estação de montante para jusante. Isso pode estar acontecendo por alguns motivos, como por exemplo a possibilidade de grandes áreas de alagamento, que ocasionam uma grande retenção de água.

Também é possível verificar algumas falhas na série de vazões, ocasionado principalmente por falhas nas séries de cotas, o que mostra que o sensoriamento remoto pode ser utilizado não apenas como uma ferramenta de validação, mas também para preenchimento dessas falhas. Essas são frequentes em algumas estações dessa região por conta de algumas variáveis, como difícil acesso às

estações e dificuldade em encontrar observadores hidrológicos para verificação de cotas diárias.

Conforme a Figura 22, no gráfico à esquerda são mostradas as médias mensais da série histórica total de cada estação. No gráfico à direita, são mostradas as médias mensais das séries dos últimos 20 anos de cada estação.

Figura 22: Vazões médias mensais das estações Fluviométricas no Rio Paraguai



Fonte: O autor (2020)

Na figura 22 é possível fazer as primeiras análises referentes às vazões com relação às áreas de cada sub-bacia. A estação São Francisco (66810000) é a antepenúltima estação mais a jusante no Rio Paraguai, e durante um período do ano, entre abril e junho, sua vazão fica maior do que a próxima estação a jusante, chamada Porto da Manga (66895000). Isso deve ser mais bem avaliado, mas possivelmente pode existir alguma influência de corpos hídricos próximos à estação, a montante e a jusante, que afetam nesse regime de vazões na região. Também deve ser considerada a possibilidade de áreas de alagamento que absorvem e liberam determinados volumes de água em algumas épocas do ano.

4.4. Obtenção de dados de satélite

Conforme citado anteriormente para o desenvolvimento dessa dissertação foram adquiridos conjuntos de dados em grade baseados em sensoriamento remoto de precipitação e de evapotranspiração.

Os dois produtos de precipitação utilizados CHIRPS e MERGE foram adquiridos respectivamente através dos sítios de internet do Climate Hazards Center (<https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>) e do INPE/CPTEC (<http://ftp.cptec.inpe.br/modelos/tempo/MERGE/GPM/>). O produto do CHIRPS tem característica de resolução espacial de 5 km, resolução temporal diária, informações disponíveis desde 1981 até o presente, em arquivos gravados em formato TIF (Tagged Image File Format), formato bastante popular que é utilizado em softwares de geoprocessamento. Os dados do CHIRPS têm cobertura quase-global para latitudes 50 Norte e 50 Sul e são baseados em produtos de sensoriamento remoto, climatologia e estações no terreno, sendo seus produtos baseados no território brasileiro na utilização de mais de 2 mil pluviômetros. O produto MERGE tem como característica resolução espacial de 10 km, resolução temporal horária, informações disponíveis desde 2000 até o presente em arquivos em formato GRIB2 (GRIdded Binary or General Regularly-distributed Information in Binary form). Os dados do MERGE têm como cobertura o continente Sul Americano e são baseados no produto IMERG (The Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM) da NASA e estações no terreno, também se utilizando de mais de 2 mil estações em território brasileiro.

O produto de evapotranspiração utilizado foi o modisSSEBopETv4 do USGS, os dados do SSEBop podem ser baixados no endereço de internet do USGS (https://edcintl.cr.usgs.gov/downloads/sciweb1/shared/fews/web/global/monthly/eta_v5/downloads/). O produto de evapotranspiração do USGS tem como característica resolução espacial de 1 (um) quilômetro, resolução temporal mensal, informações disponíveis desde 2003 até o presente. Os dados do SSEBop do USGS têm cobertura quase global disponível para latitudes de 60 Sul até 80 Norte e são baseados em dados da missão espacial MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*), no modelo SSEBop e em estações no terreno.

Os três produtos gridados baseados em sensoriamento remoto (CHIRPS, MERGE e SSEBop) foram utilizados no software de geoprocessamento Quantum GIS (QGIS) e através do suporte da biblioteca de manipulação de imagens GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) foram tratados, processados e analisados em lista de arquivos na forma a serem extraídas as informações das médias dos pixels de suas variáveis (precipitação e evapotranspiração) para as bacias hidrográficas de interesse delimitadas para esse estudo.

De forma a melhor entender algumas diferenças entre as entradas no resultado da modelagem, foram comparados os valores de chuva dos produtos de sensoriamento remoto realizando uma avaliação pontual com os postos pluviométricos existentes na área de drenagem de algumas estações da região, mostrados no capítulo de resultados.

4.5. O SmapDia/SGB

Para simulações de vazão na área de estudo foi utilizada uma ferramenta desenvolvida pelo SGB/CPRM, chamada SmapDia/SGB (<https://apps.cprm.gov.br/smap-dia> (Endereço alternativo: <https://msuassuna.shinyapps.io/smapdia/>)).

Trata-se de um aplicativo construído no intuito de facilitar aplicações com o modelo SMAP, sendo possível avaliar um conjunto grande de parâmetros e a dar uma sensibilidade do modelo a diferentes conjuntos de parâmetros em diferentes bacias. Além disso, oferece uma ferramenta interface simples para implementar o SMAP e otimizar os parâmetros utilizando algoritmo genético.

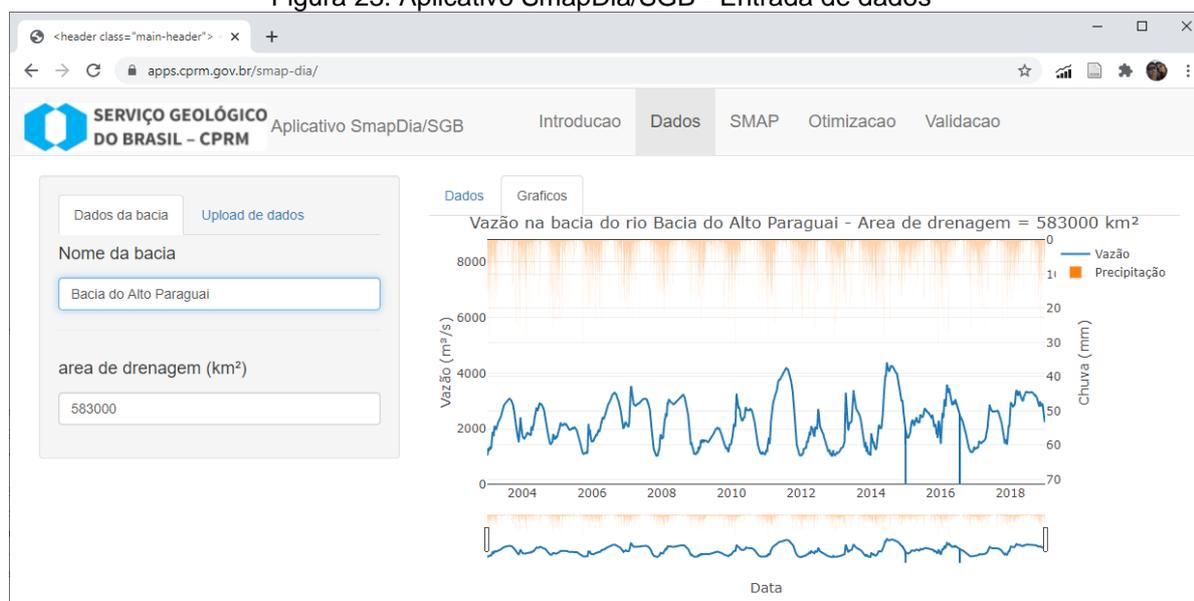
É particularmente útil para profissionais da hidrologia, estudantes e pesquisadores que desejem dedicar seu tempo a compreender o comportamento hidrológico das bacias.

O SmapDia/SGB foi produzido de modo a possibilitar uma interface fluida e intuitiva para a utilização do modelo hidrológico SMAP (Figura 23). Contudo, é importante explicitar alguns elementos acerca de sua estrutura e funcionamento.

O uso do aplicativo é composto basicamente por quatro etapas. Primeiramente o usuário insere as informações básicas da bacia, como nome e área de drenagem.

Após isso, os dados hidrológicos devem ser introduzidos utilizando-se um arquivo do tipo .csv com as informações de data, Evapotranspiração (em mm/dia), Precipitação (em mm/dia) e Vazão (em m³/s).

Figura 23: Aplicativo SmapDia/SGB - Entrada de dados



Fonte: <https://apps.cprm.gov.br/smap-dia>

Ao carregar o aplicativo com os dados de entrada, é necessário definir o início e o fim do período de calibração e validação dos dados. Após isso, é feita primeiramente uma calibração manual do modelo afim de se obter uma maior sensibilidade alterando as duas condições iniciais, teor de umidade inicial - T_{uin} (%) e a vazão básica inicial – E_{bin} (%) e também cada um dos seis parâmetros (str , $k2t$, $crec$, ai , $capc$ e kkt) conforme mostrados no item 2.4.1, visualizando o resultado dessas modificações no gráfico em tempo real e entendendo quais são os melhores valores para se iniciar a próxima etapa, que é a otimização.

Sobre as essas condições iniciais (T_{uin} e E_{bin}), tratam-se condições esperadas no primeiro dia da série. Se o período escolhido para a calibração for o início do ano hidrológico, é importante considerar que o rio está um pouco mais seco, então o T_{uin} tende a ser mais baixo. O valor de E_{bin} é sempre o valor de vazão próximo ao encontrado nesse início da série.

A visualização do gráfico de vazões observadas e estimadas é ajustada automaticamente ao se alterar cada parâmetro, bem como a estimativa do coeficiente de Nash-Sutcliffe e a relação entre escoamento de base e superficial estimada pelo SMAP.

Na penúltima etapa é possível otimizar os parâmetros calibrados por meio do algoritmo genético Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) (Junior et al, 2009). São admitidas quatro Funções objetivo diferentes: o coeficiente de Nash-Sutcliffe, a curva de permanência de vazões, e a curva de permanência considerando apenas as vazões altas ou baixas. Neste painel, as condições da bacia não são calibradas, mas sim apenas inseridos pelo/a usuário/a.

Para cada um dos seis parâmetros do modelo, é necessário definir uma faixa de valores que se acredite serem os melhores, por isso é sugerido que se utilize uma faixa que contenha os valores estimados na etapa da calibração. A cada alteração dessas faixas é possível rodar novamente o algoritmo afim de se obter melhores resultados.

Na última etapa é possível verificar o resultado do modelo calibrado com dados de validação. Os dados otimizados devem ser inseridos possibilitando a verificação do desempenho modelo com dados fora da amostra de calibração. O coeficiente de Nash Também é estimado para a amostra de validação.

Algumas dificuldades foram encontradas durante o processo de utilização dessa ferramenta SmapDia/SGB, como a escolha do período para ajustar o modelo, tanto na parte de calibração como na parte de validação. Foram escolhidos diferentes períodos de 2 anos para cada uma dessas etapas (totalizando 4 anos entre calibração e validação), afim de se encontrar os melhores resultados.

Nessa etapa foram feitas inúmeras rodagens do modelo em cada uma das estações estudadas, e os resultados estão mostrados na sequência do trabalho, na parte de resultados.

4.5.1. Revisões e ajustes nas curvas-chave e vazões

Como descrito nos itens 4.2 e 4.3, os dados de vazão utilizados no estudo tiveram como fonte o HIDROWEB da ANA, porém foram feitas análises a fim de

avaliar as vazões utilizadas, revisando as curva-chaves existentes que deram origem a esses dados.

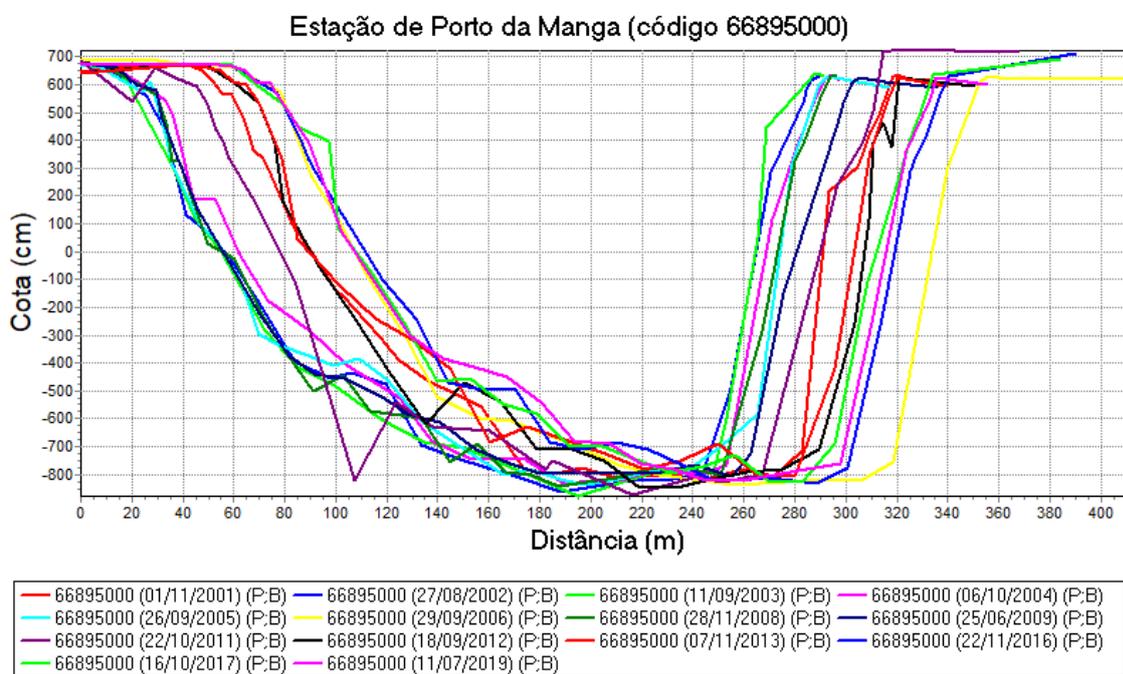
Segundo Pinheiro (2008), a curva-chave é uma equação ajustada aos dados de medição de vazão. Normalmente utilizam-se equações do tipo potência para representar uma relação entre as variáveis cota e vazão, como a equação a seguir:

$$Q = K * (h - h_0)^m$$

em que h é o nível da régua correspondente à vazão Q , h_0 é o nível da régua para o qual a vazão é nula e K e m são constantes representativos da seção fluviométrica de interesse;

As vazões existentes das estações fluviométricas localizadas no Rio Paraguai foram analisadas, verificando os dados de medições realizadas e perfis transversais das estações (Figura 24) para analisar o comportamento do rio nas margens.

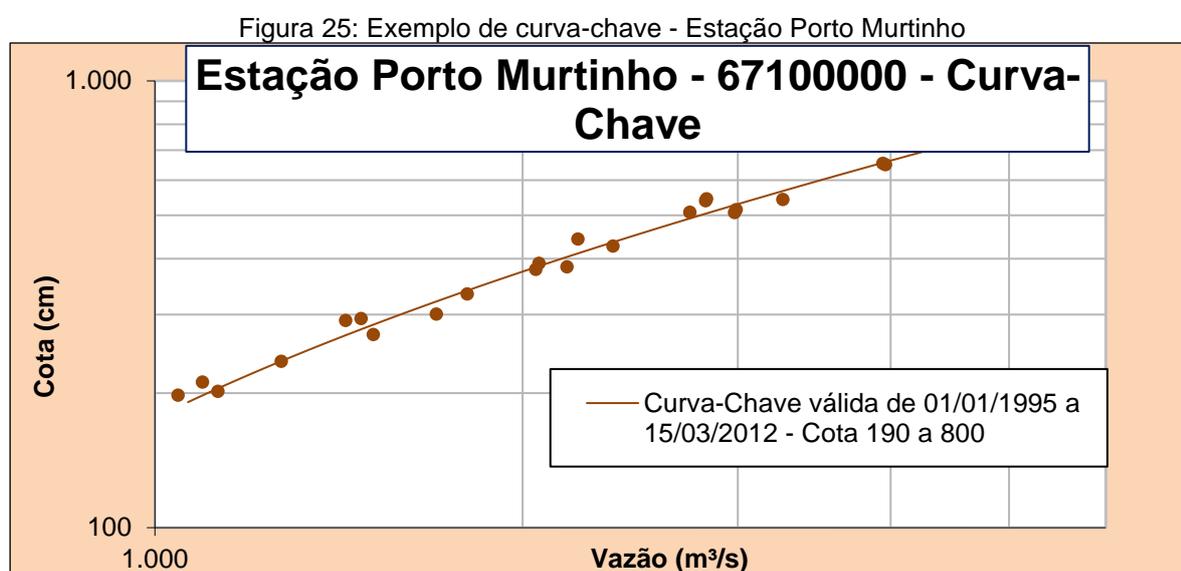
Figura 24: Perfis Transversais históricos da estação de Porto da Manga (código 66895000) utilizados para análise e revisão das curvas-chave



Fonte: O autor (2020)

A principal ferramenta utilizada para esses ajustes foi um suplemento em planilha eletrônica utilizado para teste de hipóteses chamado SOLVER. É utilizado para encontrar um valor ideal (máximo ou mínimo) para uma fórmula em uma célula — conforme restrições, ou limites, sobre os valores de outras células de fórmula em uma planilha.

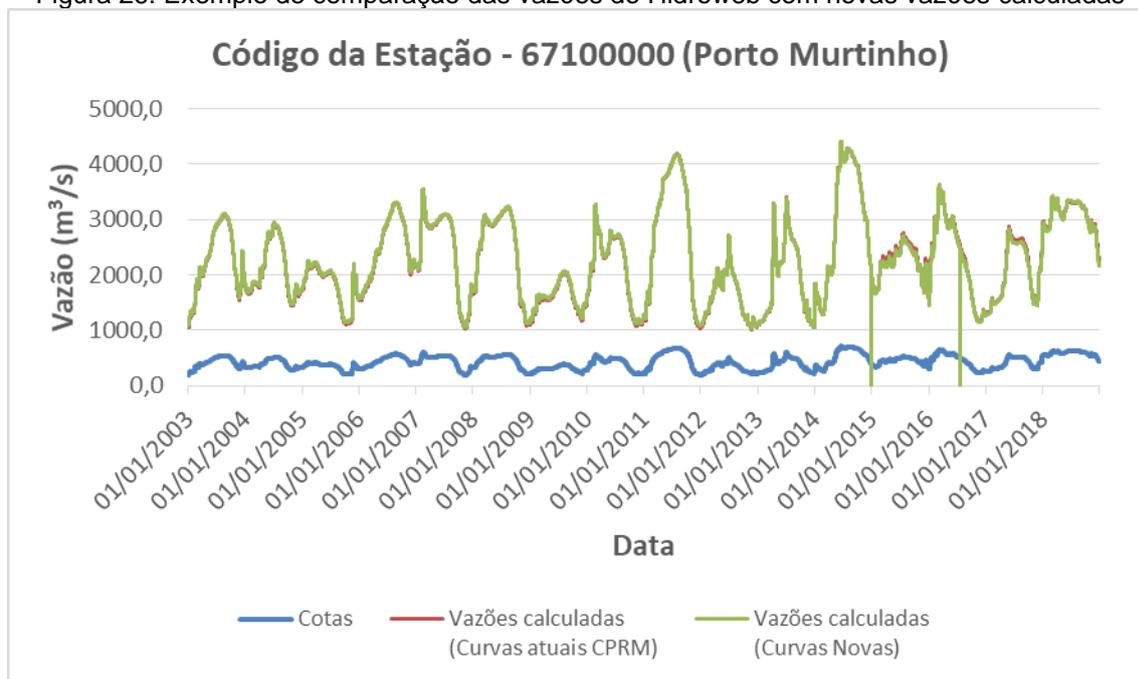
Foram feitas novas curvas-chave dessas estações, como exemplo da Figura 25.



Fonte: O autor (2020)

Como os resultados foram muito próximos das equações já existentes, não foram feitos ajustes nas curvas-chave afim de gerar novas vazões. Desse modo a fonte de vazão utilizada foi no site do Hidroweb. Um exemplo da comparação entre as vazões atualmente disponibilizadas no Hidroweb com as novas vazões calculadas através de curva-chave ajustadas é mostrado na Figura 26.

Figura 26: Exemplo de comparação das vazões do Hidroweb com novas vazões calculadas



Fonte: O autor (2020)

No caso do ajuste das curvas-chave, procurou-se minimizar ao máximo os desvios-padrão dos valores de vazão com a curva chave daquela estação fluviométrica.

5. RESULTADOS

Neste Capítulo serão apresentados os resultados dos dados de satélite obtidos, CHIRPS e MERGE, com algumas comparações entre esses produtos e estações pluviométricas distribuídas pela área, com os dados obtidos em campo.

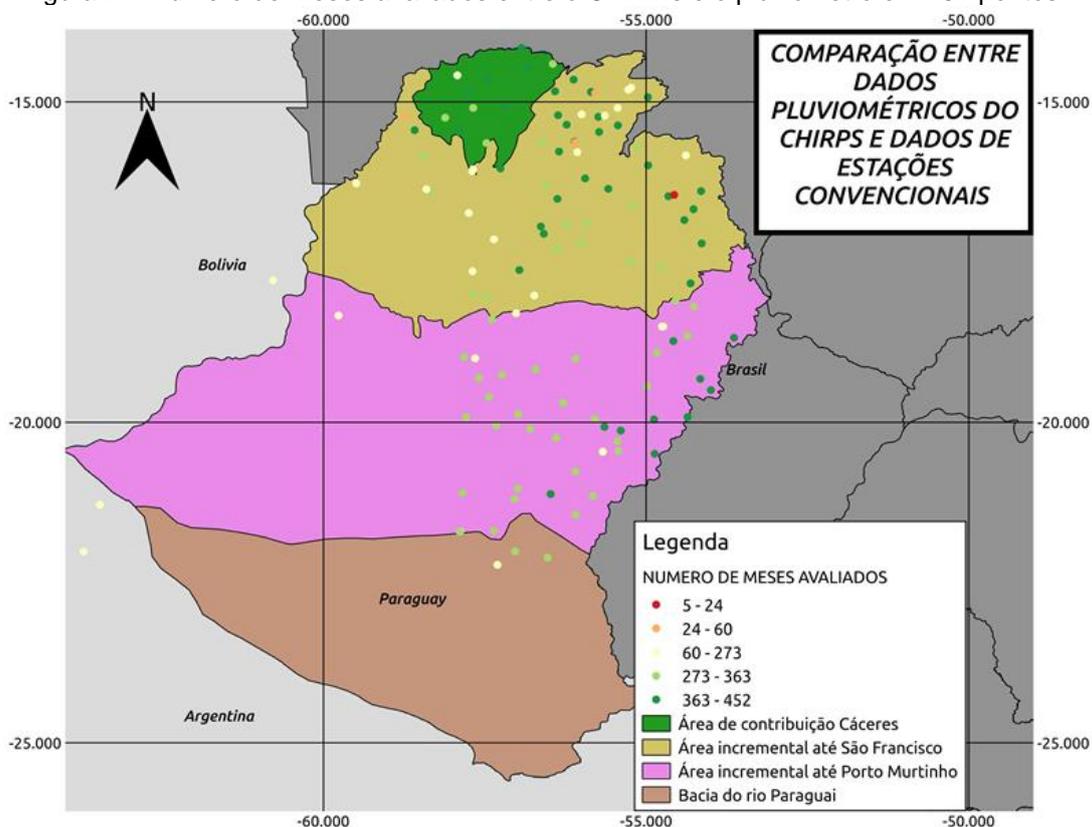
Serão mostradas as comparações dos resultados do modelo SMAP nas diferentes sub-bacias e também com outros modelos utilizados na mesma região.

5.1. Avaliação dos dados de satélite

Foram feitas comparações entre os dados do CHIRPs e dos pluviômetros convencionais em 131 pontos na bacia, dentro da região brasileira.

Numa análise total do CHIRPS de 1981 até 2019, verificou-se que dos 456 meses possíveis de análise do CHIRPs, foram encontrados dados dos pluviômetros conforme a Figura 27, indicando uma boa continuidade de informações de ambas as fontes para efeitos de comparações de valores.

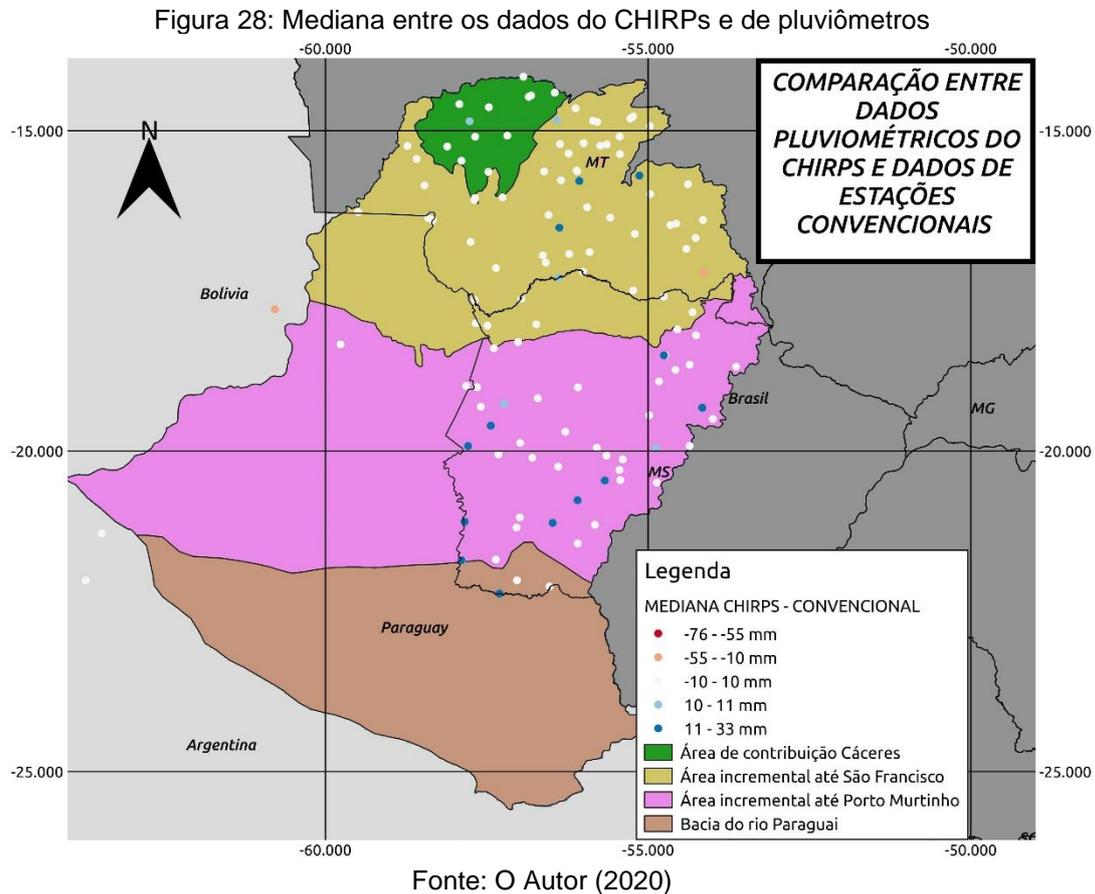
Figura 27: Número de meses avaliados entre o CHIRPs e o pluviômetro em 131 pontos



Fonte: O Autor (2020)

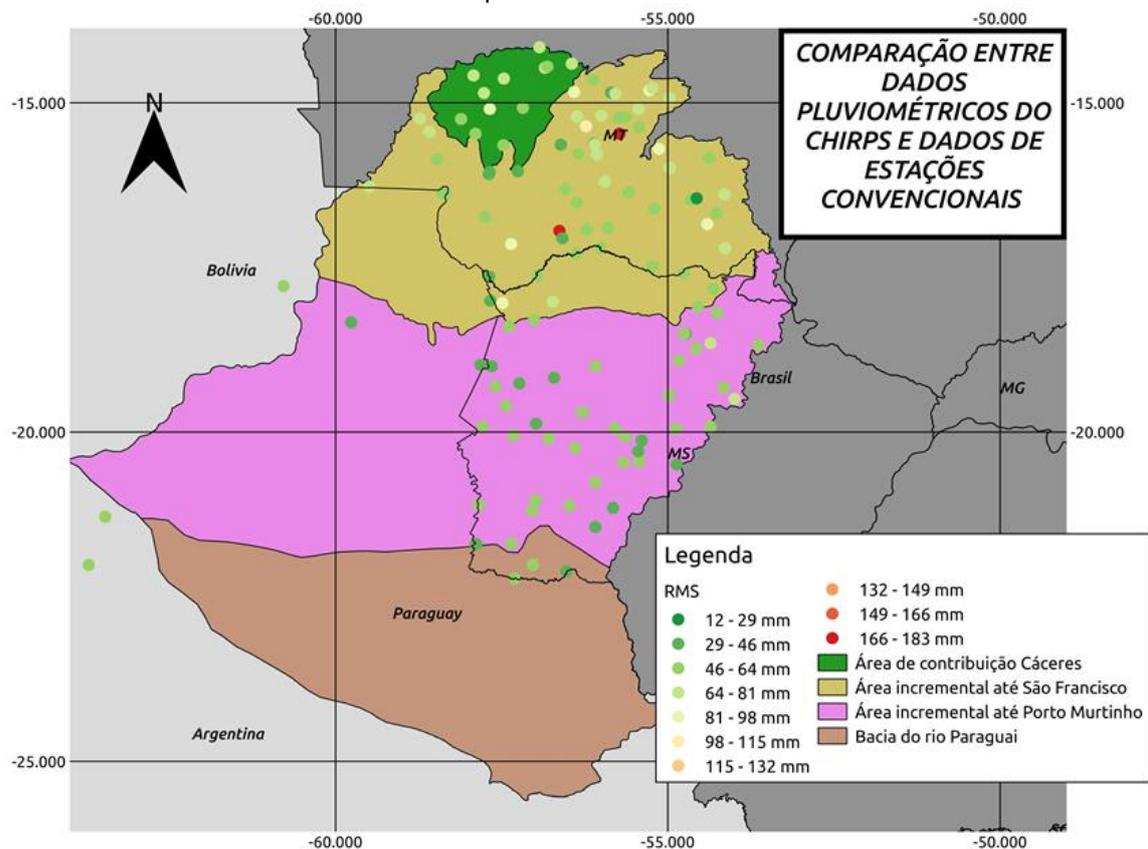
Numa comparação geral entre dados do CHIRPs e dados de pluviômetros, as medianas das diferenças dos meses de análise ficaram conforme mostrado na Figura 28. Na análise geral dos 456 meses possíveis, a mediana indica nos pontos brancos que não há tendência de superestimação ou subestimação dos dados do

CHIRPs para os dados de pluviômetros convencionais. Alguns poucos pontos apresentaram superestimação dos dados do CHIRPs.



A Figura 29 abaixo mostra a análise geral da raiz do erro médio quadrático (RMSE) entre dados do CHIRPs e dados de pluviômetros. Alguns pontos tiveram erros muito fora do esperado, indicando possíveis erros nas medições do pluviômetro.

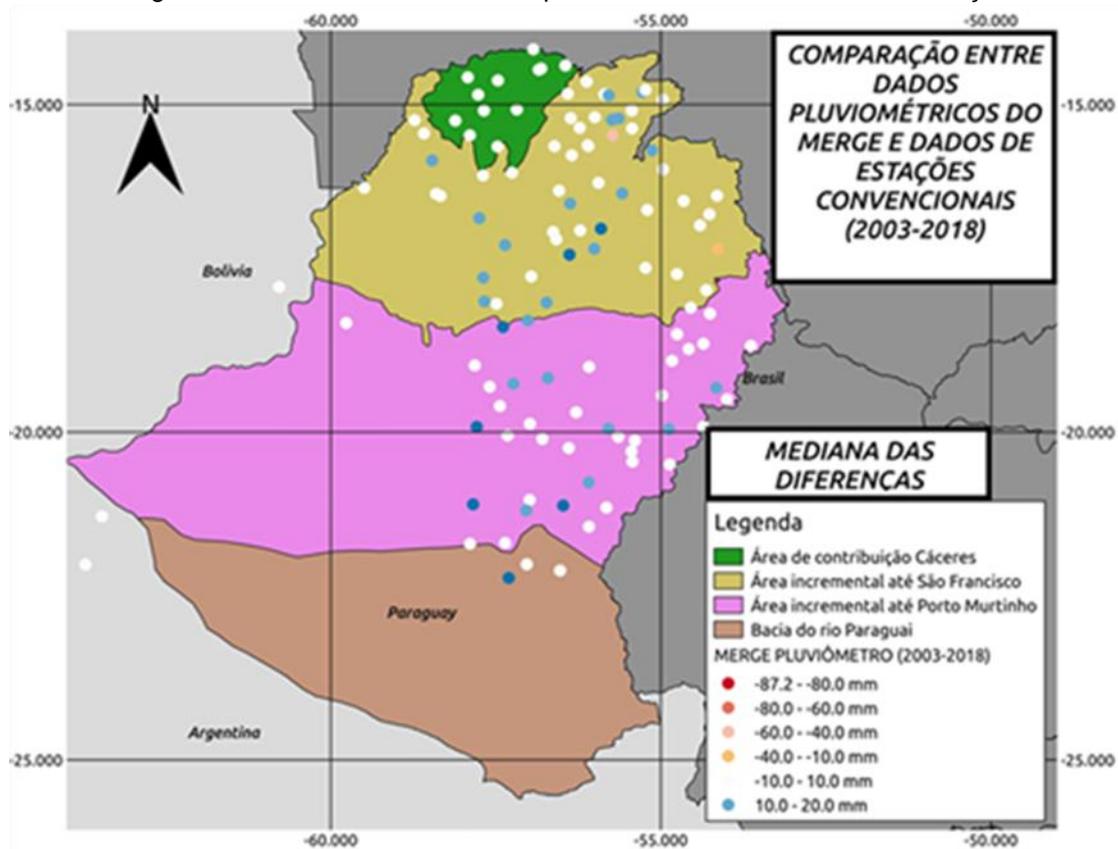
Figura 29: Análise geral da raiz do erro médio quadrático (RMSE) entre dados do CHIRPs e dados de pluviômetros



Fonte: O Autor (2020)

Outra fonte de dados de chuva através de sensoriamento remoto é o MERGE (Produto INPE). A Figura 30 mostra a comparação dos dados do MERGE com pluviômetros, e a mediana das diferenças entre os produtos.

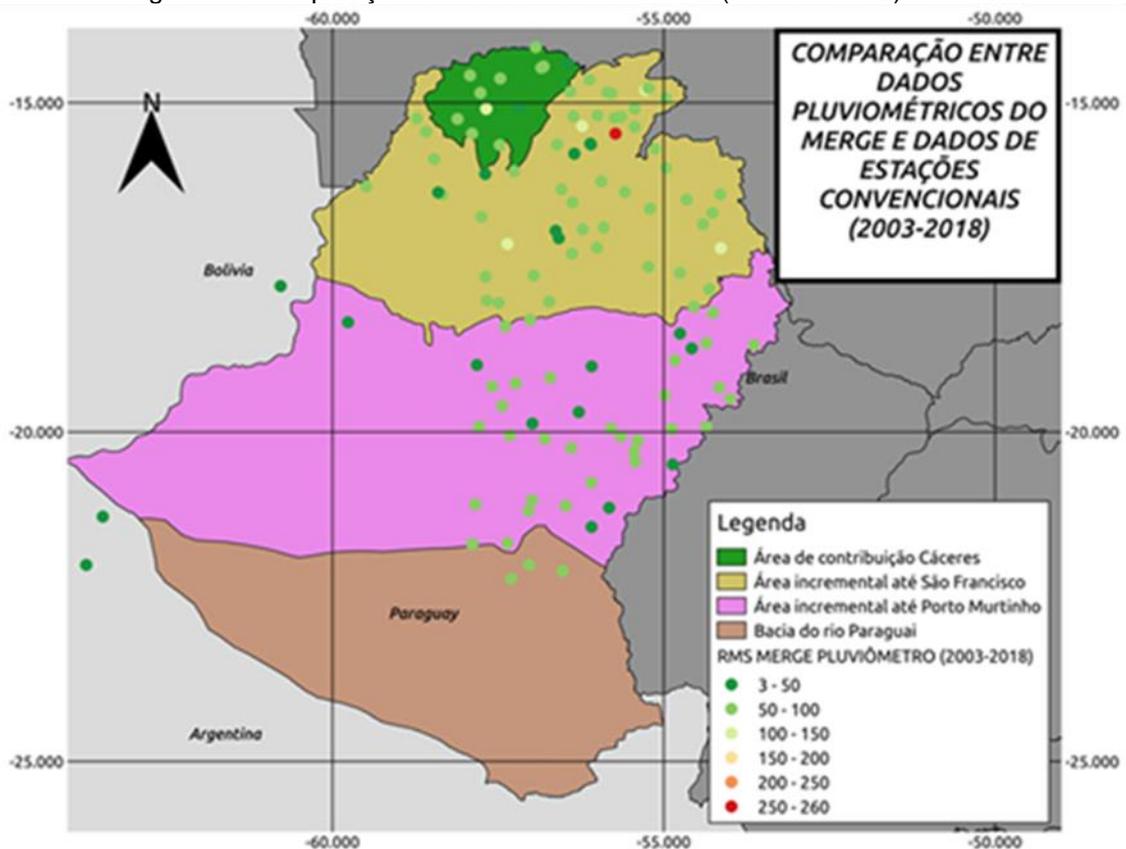
Figura 30: Dados do MERGE e de pluviômetros – Mediana das diferenças



Fonte: O Autor (2020)

Ainda comparando os dados do MERGE com pluviômetros, a Figura 31 mostra a RMSE – Raiz do erro médio quadrático entre ambos os dados.

Figura 31: Comparação do CHIRPs com MERGE (Produto INPE) - RMSE

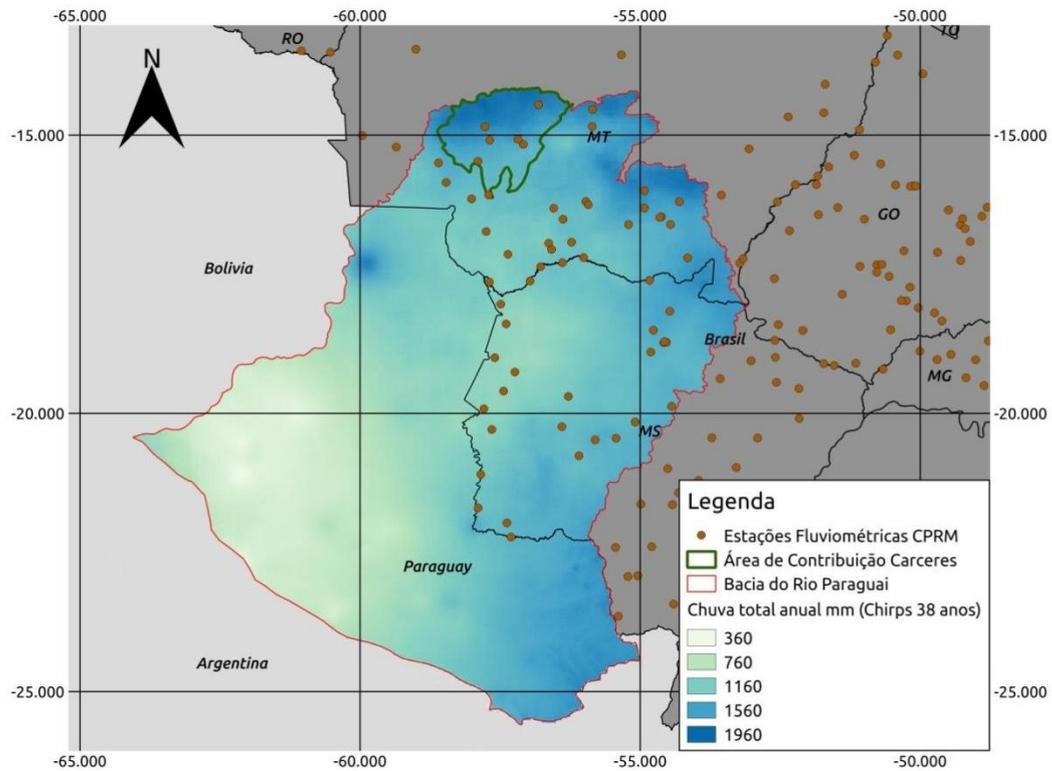


Fonte: O Autor (2020)

Após as avaliações de desempenho das ferramentas remotas, foi possível inferir na qualidade dos produtos de sensoriamento remoto na representação do regime pluviométrico da área de estudo. Os coeficientes médios de correlação com valores próximos associam esse estimador à segurança de uso. Então, a partir do processamento dos dados do CHIRPS foi possível caracterizar o regime pluviométrico da bacia do Alto Paraguai, que está entre 360 e 1960 mm anuais, sendo as maiores frequências de chuva ocorrem justamente onde se encontra a área de contribuição da estação fluviométrica de Cáceres – Figura 32.

Apesar de estar sendo mostrada toda a série de 38 anos de dados de chuva, série, será usado no estudo apenas o intervalo de 2003 a 2018 por ser um período comum de dados com o SSEBop.

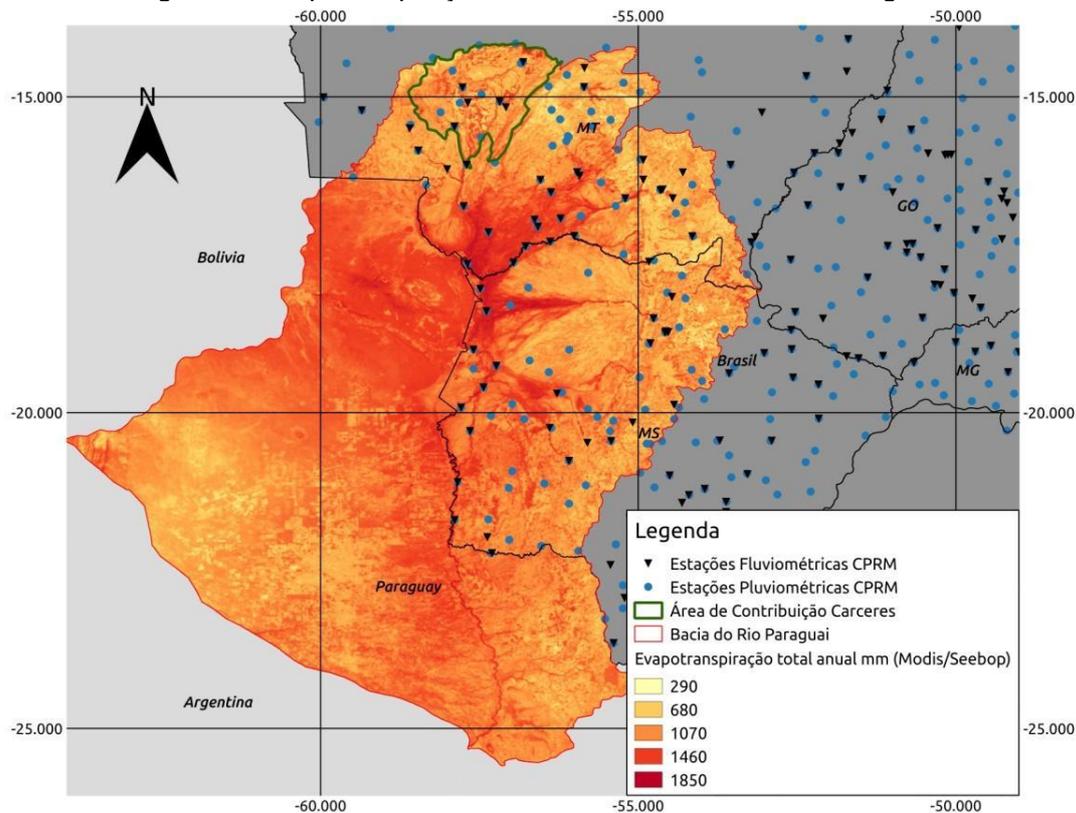
Figura 32: Chuva total anual na bacia do Alto Paraguai



Fonte: O Autor (2019)

A partir do processamento dos dados do modelo SSEBop, foi possível caracterizar a evapotranspiração da bacia do Alto Paraguai, que está entre 290 e 1850 mm anuais, sendo que as maiores frequências de chuva ocorrem na área central da bacia (Figura 33).

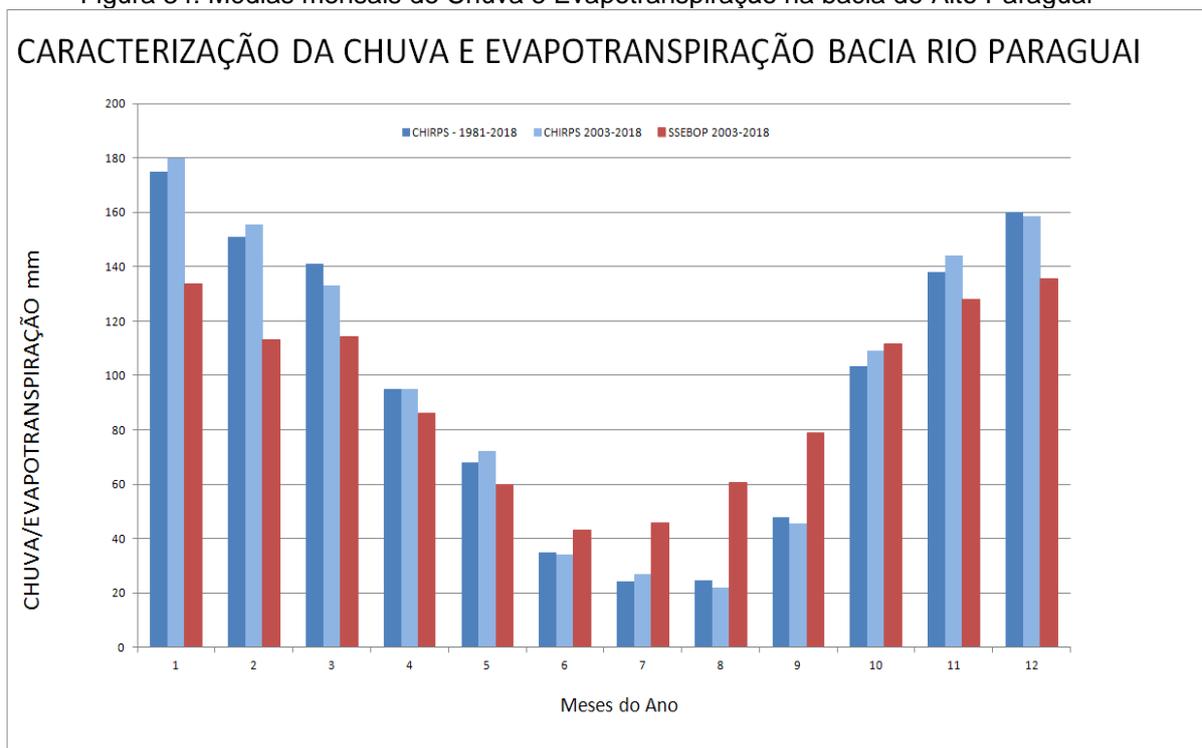
Figura 33: Evapotranspiração total anual na bacia do Alto Paraguai



Fonte: O autor (2019)

Os conjuntos de dados do SSEBop e CHIRPS foram acumulados em suas médias mensais para o período disponível e período comum da informação 2003-2018. Pelo CHIRPS foi possível notar baixa diferença entre as médias mensais nos períodos diferentes de acumulação e em comparação com dados do SSEBop. Para o período comum foi possível notar uma boa correlação entre a informação de 0.88 entre os conjuntos independentes de dados caracterizando o período úmido de outubro a março e período seco de abril a setembro (Figura 34).

Figura 34: Médias mensais de Chuva e Evapotranspiração na bacia do Alto Paraguai

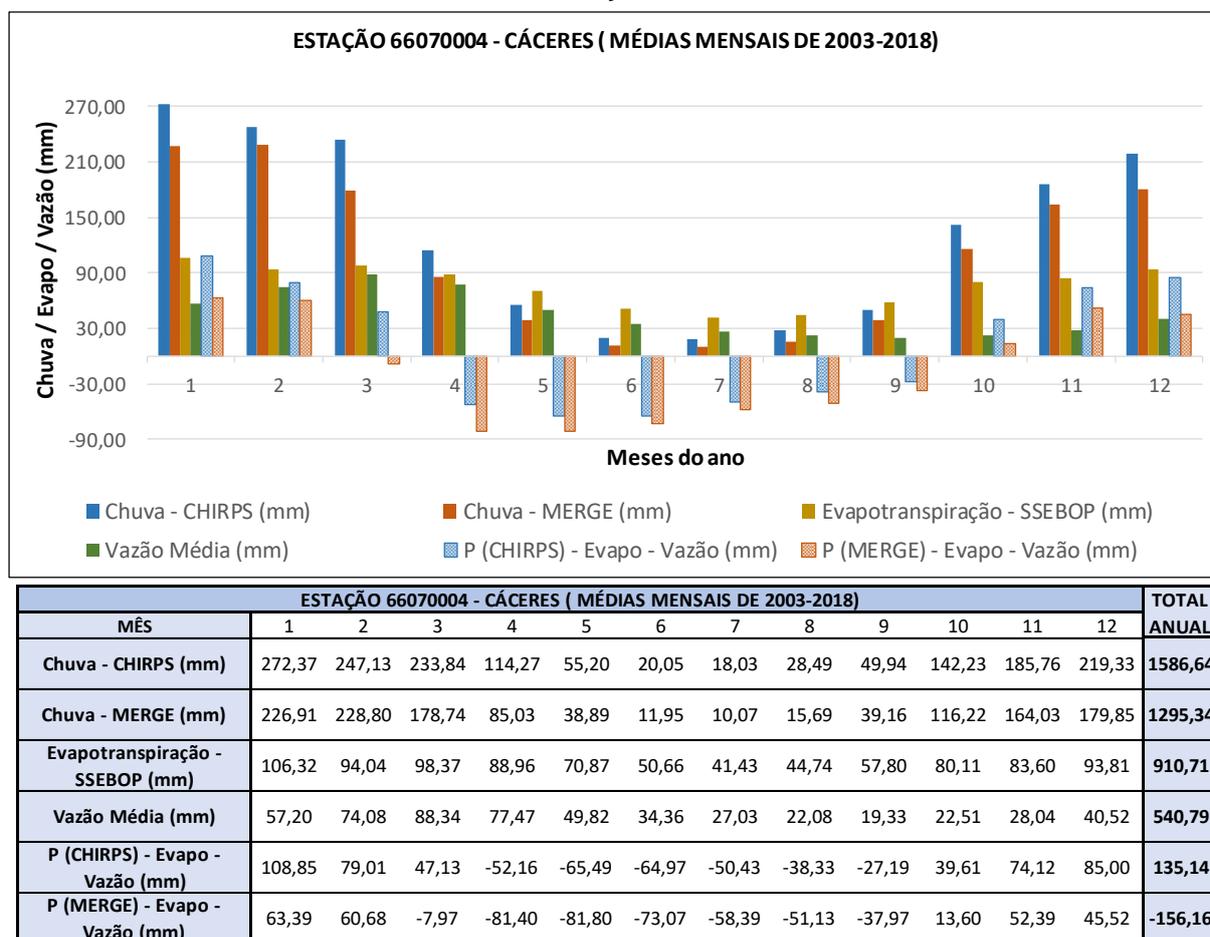


Fonte: O autor (2019)

Para a simulação de vazão, primeiramente foram analisados em conjunto os dados de vazão de estações convencionais (convertidos de m^3/s para mm), os dados de estimativas de precipitação por sensoriamento remoto (CHIRPS e MERGE) e os dados de evapotranspiração do modelo SSEBop acumulados para a área de contribuição das quatro estações do estudo. Foram analisadas as médias mensais para o período comum de dados de 2003 até 2018 - Figuras 38 a 41.

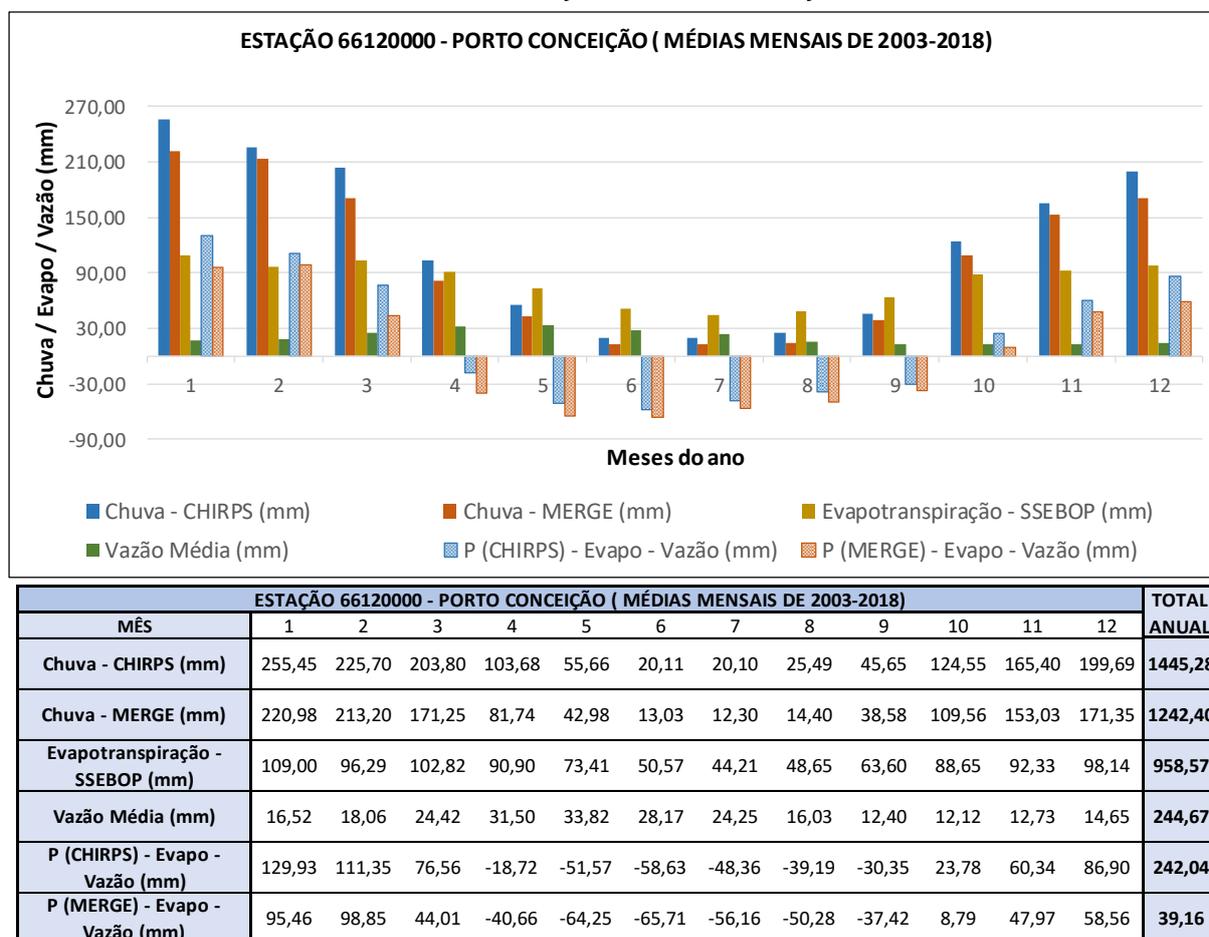
Em todas as estações foram feitos os cálculos do balanço mensal e anual, em que os valores de precipitação foram subtraídos da vazão (in situ) e evapotranspiração. Na estação de Cáceres (Figura 35), que possui a menor área de contribuição, é possível ver que para as precipitações MERGE e CHIRPS o balanço teve uma grande diferença, ficando positivo para o CHIRPS (135 mm) e negativo para o MERGE (-156 mm), indicando que existe uma grande discrepância entre as duas informações dos produtos de chuva para essa sub-bacia.

Figura 35: Médias mensais de Chuva (CHIRPS e MERGE), Evapotranspiração (SEEBop) e Vazão na área de contribuição de Cáceres



Da mesma forma, a estação de Porto Conceição que possui uma área de contribuição maior, a diferença desses balanços ainda ficou bastante considerável, sendo 242 mm para o CHIRPS e 39,16 mm para o MERGE (Figura 36).

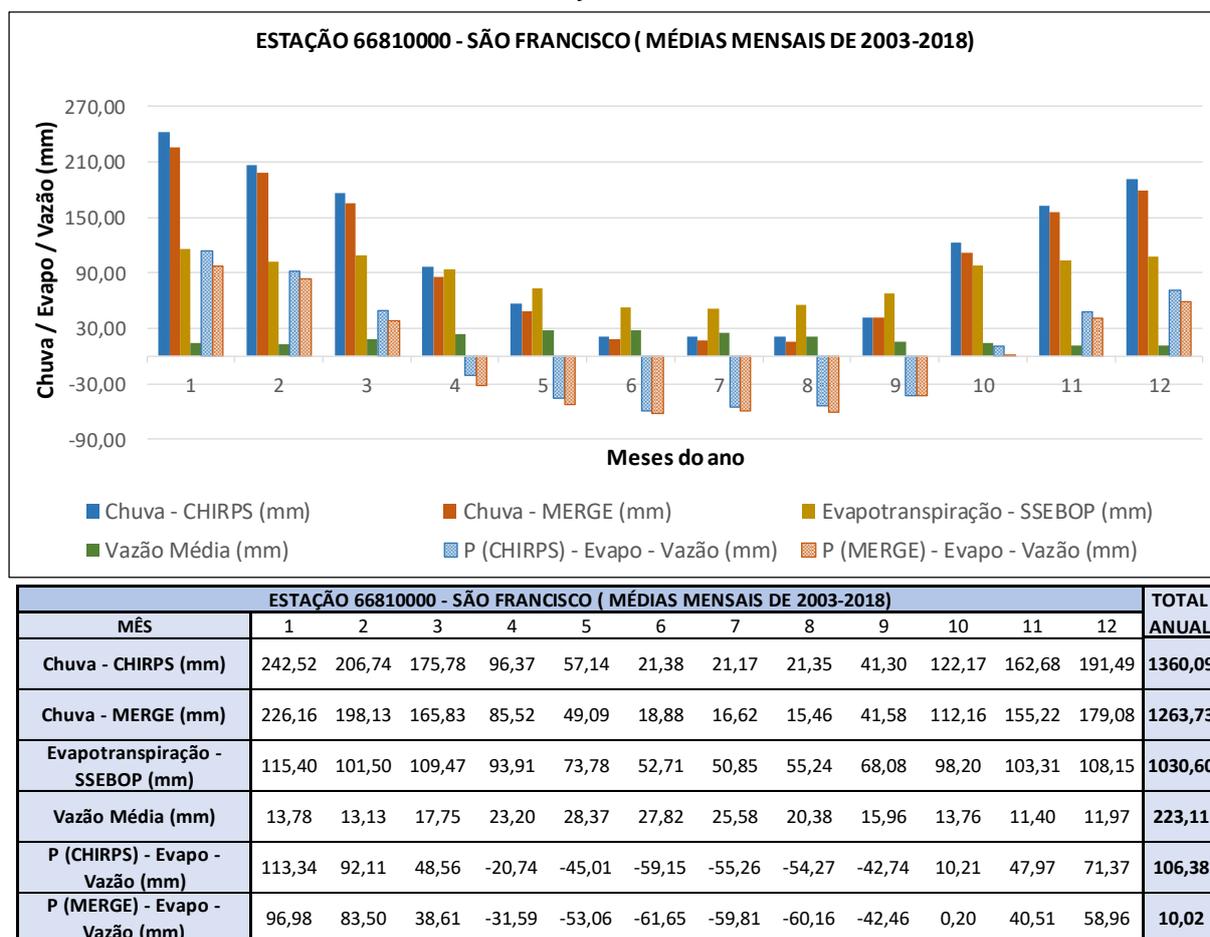
Figura 36: Médias mensais de Chuva (CHIRPS e MERGE), Evapotranspiração (SEEBop) e Vazão na área de contribuição de Porto Conceição



Fonte: O autor (2021)

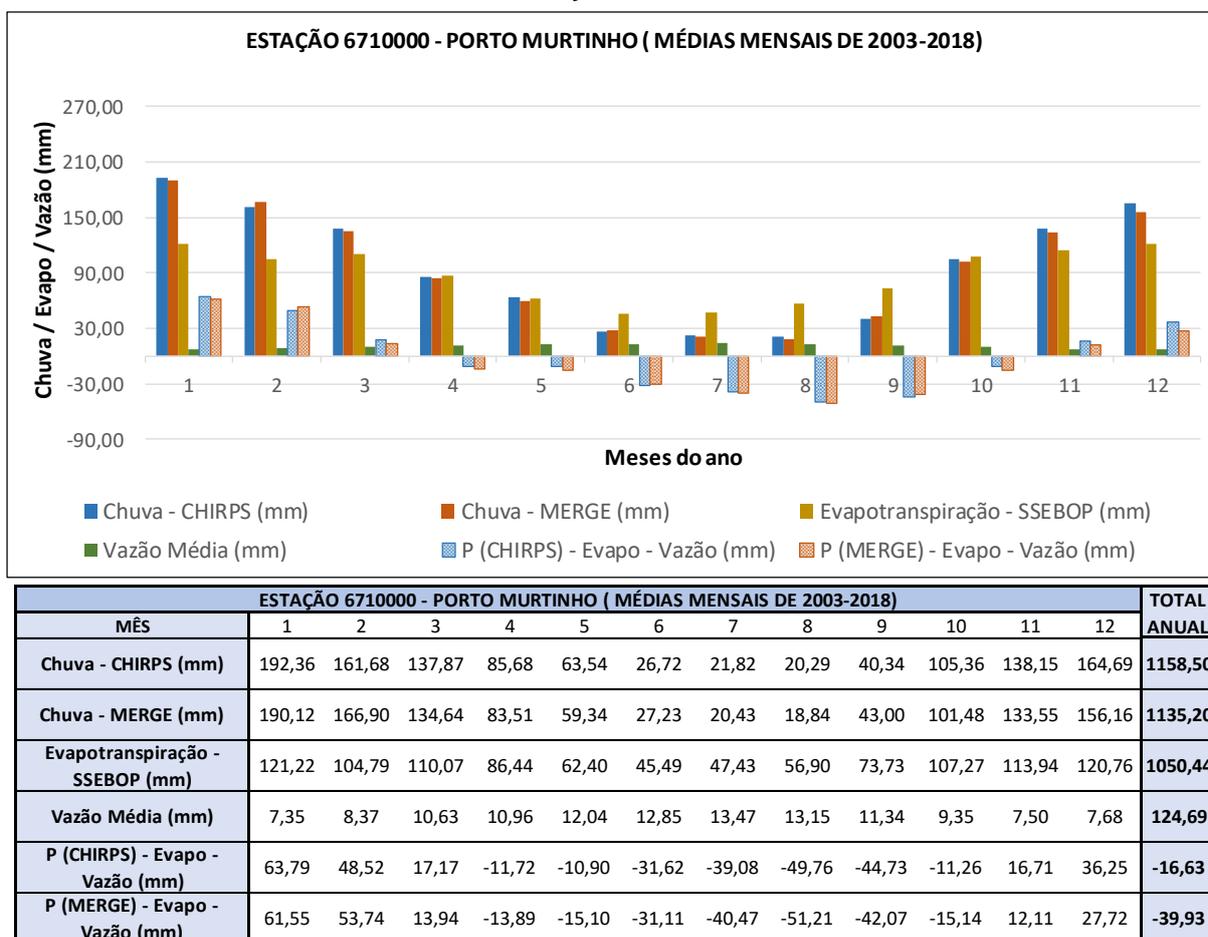
A partir da estação de São Francisco o balanço anual para das duas fontes de precipitação apresentaram um resultado com maior proximidade, sendo que o CHIRPS ainda apresenta valores superiores ao MERGE, e o balanço total anual foi de 106,38 mm e no MERGE esse valor chegou a 10,02 mm (Figura 37).

Figura 37: Médias mensais de Chuva (CHIRPS e MERGE), Evapotranspiração (SEEBop) e Vazão na área de contribuição de São Francisco



A estação com maior área de contribuição, Porto Murtinho que possui área duas vezes maior que a estação de São Francisco, apresentou os melhores resultados de balanço anual para as duas fontes de estimativa de precipitação, da qual foram obtidos -16,63 mm para dados do CHIRPS e -39,93 mm para dados do MERGE, valores muito próximo de zero (Figura 38), mostrando que nessa segunda metade de bacia existe um maior equilíbrio entre os produtos.

Figura 38: Médias mensais de Chuva (CHIRPS e MERGE), Evapotranspiração (SEEBop) e Vazão na área de contribuição de Porto Murinho



Fonte: O autor (2021)

5.2. Comparação dos resultados do modelo SMAP nas diferentes sub-bacias

Os resultados apresentados foram obtidos na plataforma SmapDia/SGB para os períodos de 2 (dois) anos de calibração e 2 (dois) anos de validação entre 2003 a 2018. Para cada sub-bacia esses períodos foram escolhidos dentro dessa faixa de tempo, pois é quando há dados em comum de evapotranspiração e chuva. Foram considerados os períodos que melhor se ajustaram ao modelo.

A função objetivo avaliada (FO1) para calibração buscou maximizar a eficiência (NSE) definida por Nash-Sutcliffe.

Foram analisados dois produtos diferentes para os dados de chuva apenas na primeira estação analisada, afim de verificar as diferenças nos resultados dessas duas fontes conforme já mostrado anteriormente: Os dados MERGE e os dados CHIRPs.

5.2.1. Sub-bacia - Cáceres

A primeira rodagem do modelo na bacia foi realizada na sub-bacia de Cáceres (66070004). No modelo utilizando dados MERGE durante os períodos de dois anos para a calibração do modelo (dezembro/2005 a novembro/2007) e dois anos para a validação (dezembro/2007 a novembro/2009), o resultado do coeficiente de Nash-Sutcliffe para o período de calibração foi de **0,82**, enquanto o resultado do coeficiente de Nash-Sutcliffe para o período de validação foi de **0,80** (Figura 39).

Figura 39: Resultados da calibração e validação do modelo SMAP utilizando dados MERGE e SSEBop como entradas - Cáceres

Resultado da validacao

Sugestao de parametros:

209.0936 14.27573 15.3147 3.659797 68.34816 71.00043



Fonte: O Autor (2021)

Para efeitos de comparação, também foram utilizados os dados CHIRPs, e o resultado do coeficiente de Nash-Sutcliffe para o período de calibração com novos parâmetros definidos foi de **0,82**, enquanto o resultado do coeficiente de Nash-

Sutcliffe para o período de validação mostrou uma grande diferença, com valor de **0,61** (Figura 40).

Figura 40: Resultados da calibração e validação do modelo SMAP utilizando dados CHIRPs e SSEBop como entradas - Cáceres

Resultado da validacao

Sugestao de parametros:

1968.745 11.77276 16.91054 0.311846 96 134.7989



5.2.2. Sub-bacia – Porto Conceição

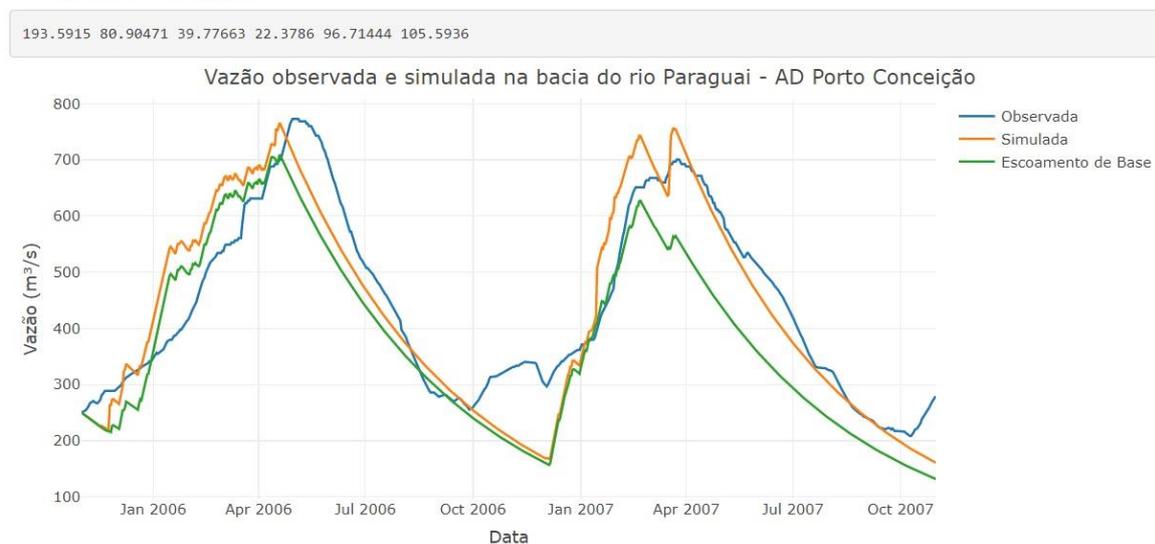
A sub-bacia seguinte a ser utilizada no modelo foi da estação Porto Conceição (código 66120000).

Para os dados de chuva também foram utilizados dados MERGE durante os períodos de dois anos para a calibração do modelo (novembro/2005 a outubro/2007) e dois anos para a validação (novembro/2007 a outubro/2009).

Os resultados do coeficiente de Nash-Sutcliffe para o período de calibração foi de **0,80**, enquanto o resultado do coeficiente de Nash-Sutcliffe para o período de validação foi de **0,43** (Figuras 41 e 42).

Figura 41: Resultado da otimização – Porto Conceição

Resultado da otimizacao

Fonte: <https://apps.cprm.gov.br/smap-dia>

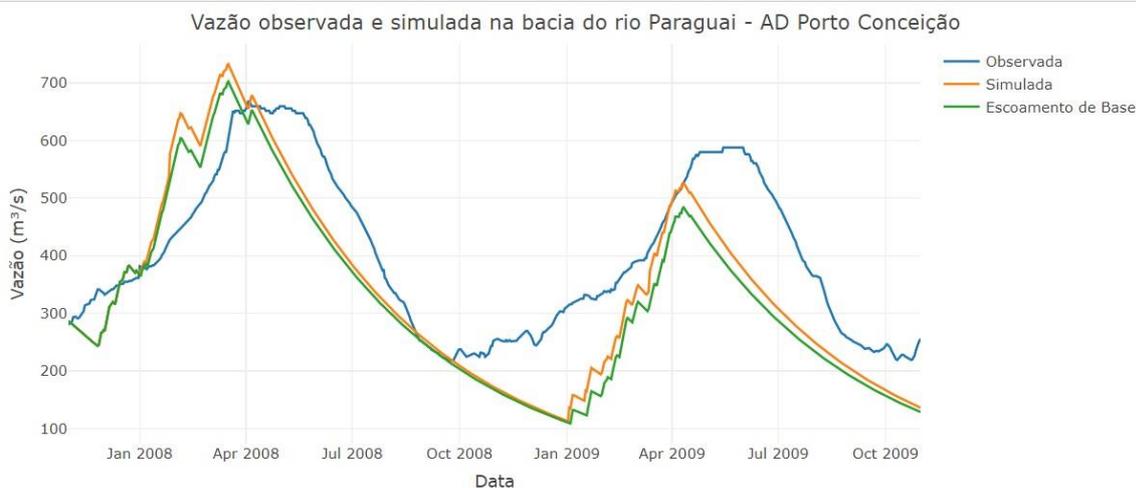
Etapa de validação da estação Porto Conceição ficou com o valor de Nash de **0,43**. A área de drenagem neste caso já é quase a metade de toda a bacia do Alto Paraguai, mostrando que o modelo começa a perder a capacidade de simular as vazões em áreas de drenagens maiores, conforme Figura 42.

Figura 42: Resultado da validação - Porto Conceição

Resultado da validacao

Sugestao de parametros:

193.5915 80.90471 39.77663 22.3786 96.71444 105.5936



Coeficiente de Nash-Sutcliffe para o periodo de validacao

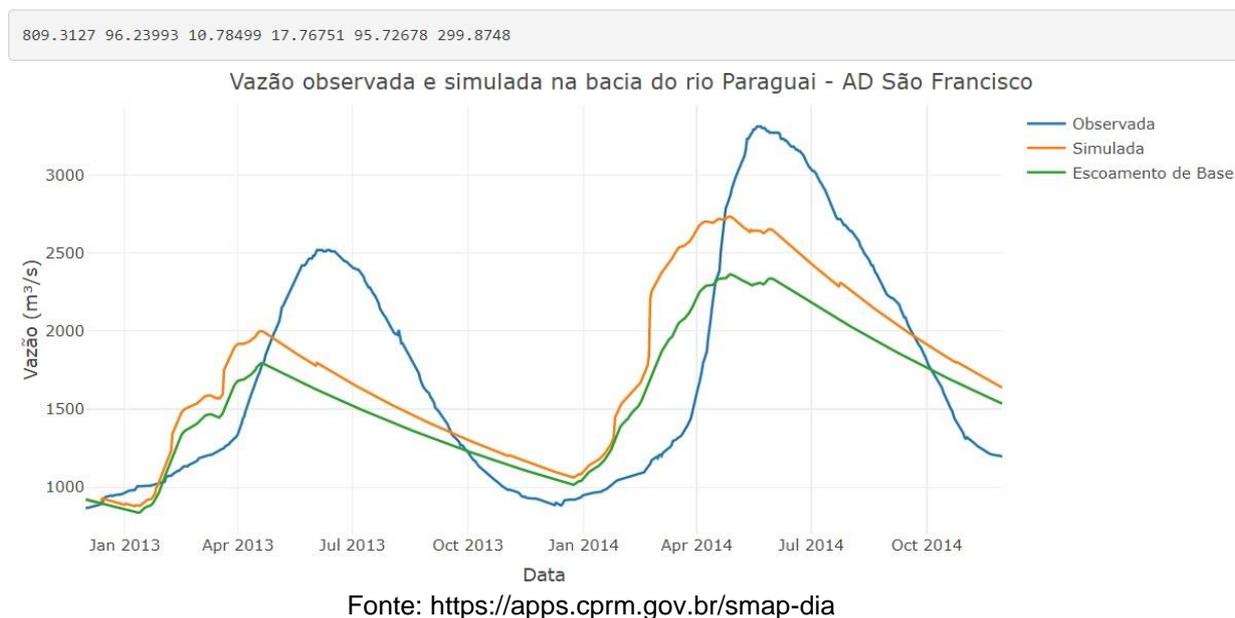
0.4304942

Fonte: <https://apps.cprm.gov.br/smap-dia>

5.2.3. Sub-bacia – São Francisco

Os resultados do modelo na sub-bacia de São Francisco (66810000) utilizando as mesmas fontes de dados das estações anteriores durante os períodos de dois anos para a calibração do modelo (dezembro/2012 a novembro/2014) e dois anos para a validação (dezembro/2014 a novembro/2016) foram os seguintes: O coeficiente de Nash-Sutcliffe para o período de calibração foi de **0,56**, enquanto o resultado do coeficiente de Nash-Sutcliffe para o período de validação foi de **0,42** (Figura 43).

Figura 43: Resultado da otimização – São Francisco
Resultado da otimizacao

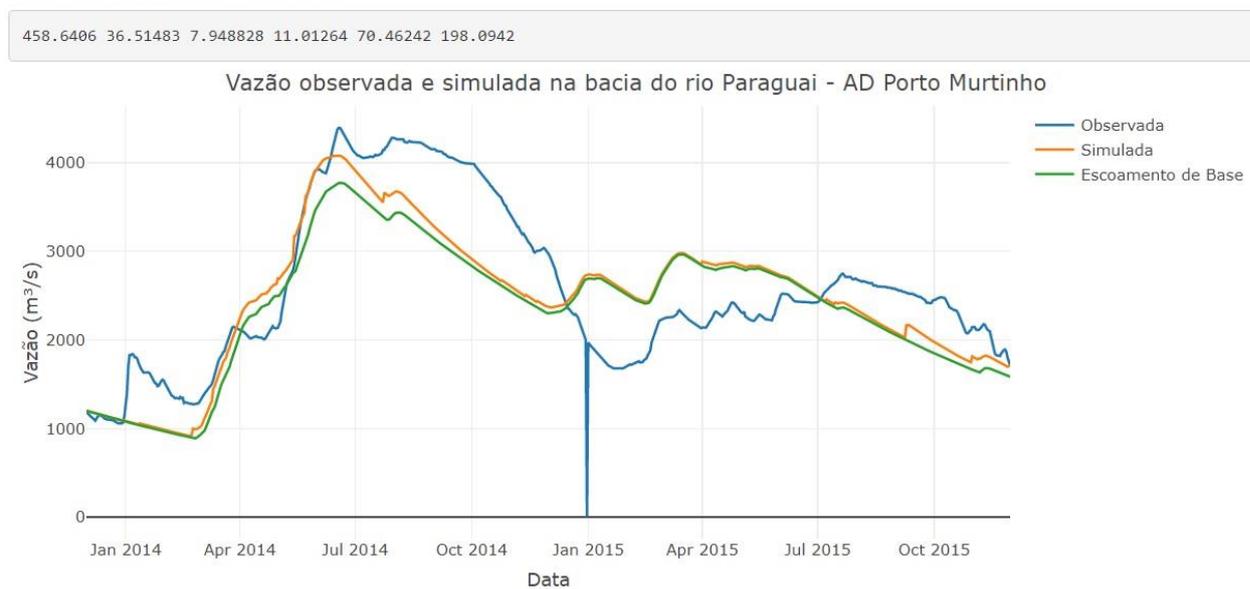


5.2.4. Sub-bacia – Porto Murinho

Na estação mais à jusante da bacia do Alto Paraguai, também foram utilizadas as mesmas fontes de dados utilizadas até aqui durante os períodos de dois anos para a calibração do modelo (dezembro/2012 a novembro/2014) e dois anos para a validação (dezembro/2014 a novembro/2016). Os resultados de Nash foram de **0,63** para a calibração de **0,44** para a validação (Figura 44).

Figura 44: Resultado da otimização - Porto Murtinho

Resultado da otimizacao



Fonte: <https://apps.cprm.gov.br/smap-dia>

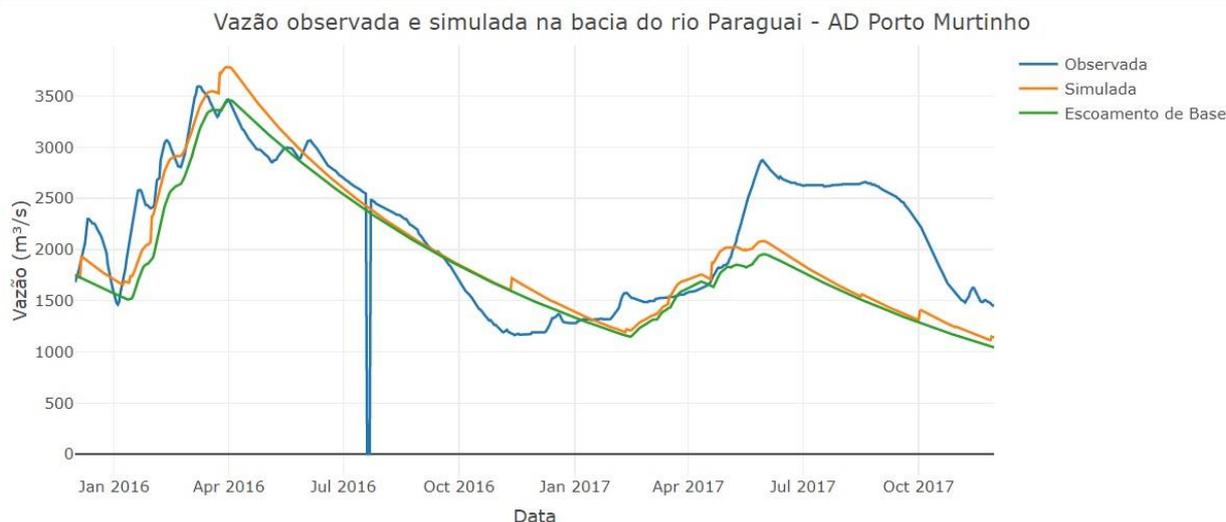
Na estação com a maior área de drenagem da bacia do Alto Paraguai, o modelo também não apresentou resultados satisfatórios, com um Nash de **0,44** (Figura 45).

Figura 45: Resultado da validação - Porto Murtinho

Resultado da validação

Sugestão de parâmetros:

458.6406 36.51483 7.948828 11.01264 70.46242 198.0942



Coeficiente de Nash-Sutcliffe para o período de validação

0.4443181

Fonte: <https://apps.cprm.gov.br/smap-dia>

5.3. Comparação dos resultados do modelo SMAP com outros modelos

Para efeitos de comparação, os resultados apresentados foram analisados e comparados com um outro estudo feito na bacia do Alto Paraguai utilizando uma combinação de outros modelos para caracterização hidrológica.

Como se pode ver em Jardim et al. (2020), foram utilizadas vazões calculadas obtidas por uma combinação de dois modelos hidrológicos, com o objetivo de avaliar a magnitude e extensão das mudanças do regime fluvial causadas pela operação de uma barragem específica, visto que a região possui alguns casos desse tipo de atividade. Foram definidas a magnitude, extensão e distribuição espacial dessas mudanças no regime hidrológico causadas por essa grande barragem no Pantanal, que é uma região de importância ecológica reconhecida mundialmente.

No estudo Jardim et al. (2020) foram utilizados os modelos MGB (Collischonn et al., 2007b), que foi aplicado basicamente nas regiões acima de 200 metros, e o

SIRIPLAN (Paz et al., 2011) que foi aplicado nas regiões abaixo de 200 metros, onde a rede de drenagem não possui grandes ramificações, e onde existem vários lagos interligados, áreas inundadas temporárias e canais secundários. As comparações dos resultados de ambos os estudos estão na Tabela 4.

As informações utilizadas por Jardim et al. (2020) de precipitação e de vazão foram adquiridas através do site da ANA, e as informações de precipitação fora do Brasil foram obtidas a partir do produto Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP), que é baseado principalmente em estimativas de precipitação de satélite – Figura 46.

Figura 46: Resultados da calibração dos modelos MGB e SIRIPLAN em estações da bacia do Alto Paraguai.

Gaude ID	Gauge Code	Gauge name	Drainage area (km ²)	River	Nash	Nash-log	BIAS (%)
1	66070004	Cáceres	32400	Paraguai	0.816	0.851	2.0
2	66072000	Porto Esperidião	5660	Jauru	0.402	0.502	-13.6
3	66090000	Descalvados	47100	Paraguai	0.910	0.920	-5.0
4	66120000	Porto Conceição	64000	Paraguai	0.630	0.620	7.6
5	66160000	Quebó	4260	Cuiabá	0.601	0.789	-25.1
6	66250001	Rosário Oeste	16000	Cuiabá	0.709	0.784	-6.5
7	66255000	Acorizal	19700	Cuiabá	0.758	0.825	-3.8
8	66260001	Cuiabá	23500	Cuiabá	0.748	0.821	-5.5
9	66280000	Barão de Melgaço	28900	Cuiabá	0.940	0.970	-5.8
10	66340000	Porto Cercado	36900	Cuiabá	0.910	0.920	-4.6
11	66360000	São João	38500	Cuiabá	0.820	0.840	-8.8
12	66460000	Acima do Córrego Grande	23000	São Lourenço	0.588	0.823	-1.0
13	66470000	São José do Boriréu	24100	São Lourenço	0.920	0.940	4.9
14	66600000	São Jerônimo	23300	Piquiri	0.581	0.665	-6.8
15	66650000	São José do Piquiri	30000	Piquiri	0.750	0.820	8.9
16	66750000	Porto Alegre	103000	Cuiabá	0.820	0.850	8.3
17	66800000	Amolar	234000	Paraguai	0.670	0.720	6.3
18	66810000	São Francisco	243000	Paraguai	0.700	0.730	-2.0
19	66870000	Coxim	27600	Taquari	0.326	0.531	-7.3
20	66886000	Perto da Bocaina	2840	Negro	-1.034	-0.124	32.9
21	66895000	Porto da Manga	327000	Paraguai	0.820	0.760	2.5
22	66910000	Miranda	15000	Miranda	0.273	0.579	15.7
23	66945000	Aquidauana	15700	Aquidauana	-0.403	0.491	19.4
24	66950000	Porto Ciriaco	17200	Aquidauana	0.760	0.830	-3.5
25	67100000	Porto Murtinho	576000	Paraguai	0.610	0.650	-6.1
26	67170000	São Carlos	10200	Apa	0.484	0.620	11.0

Fonte: Jardim et al. (2020)

Foram observadas as diferenças nos valores de ambos os modelos em algumas bacias em comum, identificando que os melhores valores utilizando o

SMAP aconteceram basicamente nas regiões de menor área de drenagem, enquanto naquelas regiões com grandes áreas de drenagem, esses modelos acima apresentados mostraram-se mais eficientes que o SMAP, conforme a Tabela 4 e a Figura 47.

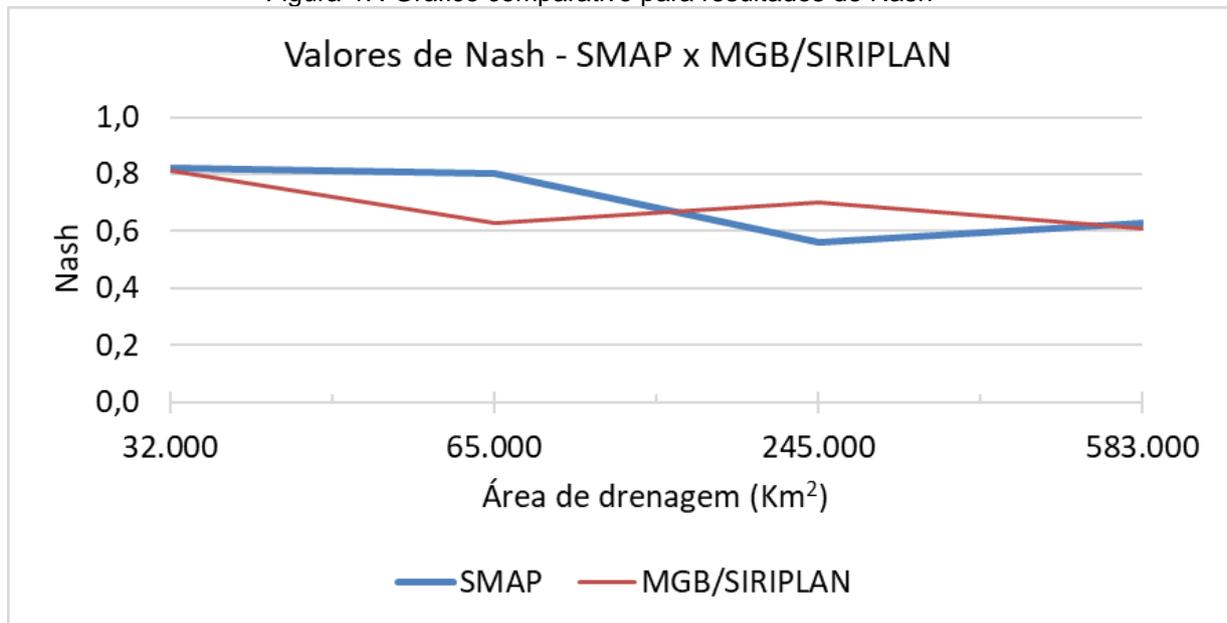
Tabela 4: Comparação de resultados em diferentes áreas de drenagem

Código da Estação	Nome da Estação	Área de drenagem (Km ²)	Valores de NASH	
			SMAP	MGB/SIRIPLAN
66070004	Cáceres	32.000	0,82	0,81
66120000	Porto Conceição	65.000	0,80	0,63
66810000	São Francisco	245.000	0,56	0,70
67100000	Porto Murinho	583.000	0,63	0,61

Fonte: O autor (2020)

A Figura 47 mostra o comparativo do modelo utilizado no presente estudo com o modelo MGB/SIRIPLAN, em que o SMAP teve melhores valores apresentados nas menores áreas de drenagem, e o MGB/SIRIPLAN apresentou melhores resultados nas estações com maior área de drenagem, mesmo considerando as extensões de inundação da região.

Figura 47: Gráfico comparativo para resultados de Nash



6. CONCLUSÕES E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

6.1. Conclusões

Os conjuntos de dados baseados em sensoriamento hidrológico têm se mostrado eficientes na caracterização das chuvas e da evapotranspiração da bacia do Alto Paraguai e para a área de contribuição das estações mais a montante da calha principal mostradas no trabalho, conforme apresentado também em Allasia et al. (2015).

Na primeira etapa de avaliação dos dados, a relação entre os pluviômetros e o CHIRPS mostrou grande consistência, sendo possível verificar que não existe viés entre as estações e esse produto de sensoriamento remoto, com um bom índice de acertos na comparação direta entre pluviômetro e dados de satélites.

Numa segunda etapa, os dados de chuva também foram avaliados nas regiões das bacias das quatro estações hidrometeorológicas do estudo, em que foi mostrada grande consistência dessas informações em relação a outras variáveis do ciclo hidrológico e à sazonalidade durante o ano dos períodos de chuva, a evapotranspiração e a vazão, porém foi detectada uma discrepância significativa da informação de chuva entre o CHIRPS e o MERGE, onde no CHIRPS as chuvas foram bem superiores, chegando a até 20% de diferença para algumas bacias.

Na bacia de maior extensão, Porto Murtinho, essa diferença foi mais equilibrada mostrando que os valores de chuva foram compensados em regiões que anteriormente eram superestimadas num produto em relação a outro. Isso é basicamente causado pela diferença da utilização dos algoritmos de aplicação dos dados de satélites entre as estações, pois esses produtos CHIRPS e MERGE são baseados em estações convencionais, e como nessas estações convencionais não foram detectadas grandes diferenças entre os produtos, então essas maiores discrepâncias foram justamente em zonas onde não existem as estações convencionais.

A partir disso, esses dados foram aplicados na última avaliação que é justamente a modelagem hidrológica, onde nas bacias menores a calibração do modelo compensou as diferenças de chuva basicamente aplicando as relações de

balanço hídrico, adaptando os outros parâmetros do modelo para ajustar as chuvas e vazões, e conforme as áreas de drenagem foram aumentando, apesar de uma maior consistência dos índices de chuva, a modelagem se tornou mais complexa muito por conta das áreas de inundação e dificuldades de modelagem da propagação do Rio Paraguai, o que também foi notado em trabalhos como visto em Jardim et al. (2020).

Portanto, conclui-se que os dados de sensoriamento remoto são capazes de demonstrar a sazonalidade do ciclo hidrológico na bacia do Alto Paraguai, mostrando as relações entre chuva, evapotranspiração e vazão, e possui uma boa consistência para a bacia num geral, apesar de mostrar algumas discrepâncias em bacias menores, em torno de 20%.

Num contexto mais amplo, a simulação do SMAP que teve utilizado o conjunto de dados do MERGE para a pluviometria apresentou resultados gerais melhores do que os baseados no produto CHIRPS em aproximadamente 30% na validação dos dados. Na calibração houveram resultados semelhantes, no entanto o produto MERGE mostrou resultados superiores na validação dos dados.

Apesar da dificuldade de representar a propagação em uma grande bacia que possui grandes extensões inundadas com um modelo concentrado, o sensoriamento remoto mostrou-se eficiente na caracterização das chuvas e da evapotranspiração da bacia do Alto Paraguai nas áreas de contribuição das estações mais a montante da região. Os resultados desse estudo para a primeira estação avaliada (Cáceres) apresentaram resultados semelhantes ao trabalho de Jardim et al. (2020), também com valor de *Nash* de 0,82 na calibração do modelo. Jardim et al. (2020) utilizaram um modelo mais complexo com dados de postos pluviométricos.

Pode-se concluir através do resultado apresentado e das comparações realizadas que para uma bacia transfronteiriça como a bacia do Alto Paraguai, devido à dificuldade de existir uma rede integrada entre países, a aplicação complementar de conjunto baseados em sensoriamento remoto ajudam a espacializar e homogeneizar representando melhor a informação hidrológica, servindo também para preenchimento de falhas que são inerentes ao

monitoramento convencional e possibilitando a utilização desses produtos de forma satisfatória para a simulação hidrológica das vazões nas estações da bacia do Alto Paraguai.

Em geral os resultados são satisfatórios, indicando boa probabilidade de uso dessas ferramentas como suporte à gestão dos recursos hídricos para a bacia.

6.2. Proposta de trabalhos futuros

Considerando todas as questões analisadas no estudo, é possível analisar e definir algumas recomendações sobre próximos passos a serem realizados, como tentar aprimorar as curvas-chaves existentes em todas as estações da bacia e a importância da gestão sobre o trabalho de atualizações contínuas dessas curvas

É importante que se mantenham os pluviômetros convencionais, e parte do trabalho foi justamente utilizar esses pluviômetros para avaliar os dados de satélite. Foi percebido que a maioria dos pluviômetros comparados tiveram boa aderência com esses dados de satélites. Em uma avaliação geral a rede convencional funciona muito bem, porém na possibilidade de apresentar alguns erros mais grosseiros, esta pode ter um grande auxílio dos dados de satélites.

Para a questão do sensoriamento remoto, como recomendação a sugestão é que as redes de monitoramento sejam densificadas permitindo um melhoramento dos algoritmos que são baseadas em estações convencionais.

Já para a modelagem, uma sugestão é a utilização de modelos mais complexos que levem em conta as áreas de armazenamento ou planícies de inundação conforme foi demonstrado nos dados obtidos através dos dados do GIEMS (Figura 14), onde são mostradas as zonas de inundação na bacia que dificultam a modelagem. É possível verificar que a partir das regiões com maior área de drenagem, principalmente nos meses de janeiro até junho, existe muito armazenamento superficial na bacia, e isso dificulta a propagação, inclusive alterando a vazão devido à mudança na relação cota x vazão: se a bacia está armazenando água ou vazando água para uma mesma cota, a vazão será diferente em ambos os casos.

Ainda com referência a modelagem, outra sugestão seria realizar mais testes em outros produtos de sensoriamento remoto, afim de verificar alguma possibilidade de melhores resultados apresentados e aplicação de outros tipos de modelos hidrológicos. Para uma melhor modelagem, principalmente em áreas da bacia do Paraguai que sofrem maior influência de zonas de inundação é interessante utilizar um modelo e informações de vazão de entrada para calibração que levem em conta esse armazenamento nas áreas de alagamento, em adição a tentativa de usar um

modelo distribuído que poderia melhor caracterizar as diferenças entre regiões de acordo com o armazenamento.

Novas fontes de dados de sensoriamento remoto podem ser utilizadas como o próprio produto GIEMS para tentar modelar a contribuição das zonas de inundação e também como outros produtos de chuva e evapotranspiração que podem ter desempenhos melhores na região da bacia do rio Paraguai.

7. REFERÊNCIAS

A água no Brasil: da abundância à escassez. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2018-10/agua-no-brasil-da-abundancia-escassez>>. Acesso em: 21 dez. 2020.

ALLASIA, D. G. et al. MODELO HIDROLÓGICO DA BACIA DO ALTO PARAGUAI. p. 20, 2015.

ALLEN, R. G. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-model. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. v. 133, n. 4, p. 380–394, jul. 2007.

ANA. Evolução da Rede Hidrometeorológica Nacional - ANA. v. 1, p. 15, abr. 2007.

ANA. **Cuidando das águas: soluções para melhorar a qualidade dos recursos hídricos / Agência Nacional de Águas, Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. 2. ed. -- Brasília: ANA, 2013.** ANA, , 2011. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2013/CuidandoDasAguas-Solucao2aEd.pdf>>

ANA. Orientações para Operação de Estações Hidrométricas. **Orientações para Operação de Estações Hidrométricas**, p. 52, 2012.

BARBOSA, C. C. F. Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos - INPE. p. 178, 2019.

BASTIAANSEN, W. G. M. et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212–213, p. 198–212, 1 dez. 1998.

BRASIL DAS ÁGUAS. **Brasil das Águas - Revelando o azul do verde e amarelo » Região Hidrográfica do Paraguai**, 2020. Disponível em: <<http://brasildasaguas.com.br/educacional/regioes-hidrograficas/regiao-hidrografica-do-paraguai/>>. Acesso em: 5 nov. 2021

CARLOS TUCCI; COLLISCHONN, W. Simulação Hidrológica de grandes Bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 1, p. 95–118, 2001.

COELHO, B. Z. Avaliação de Técnicas e Métodos de Hidrometria na Estação Fluimétrica São Ludgero, SC. p. 85, jun. 2011.

COLLISCHONN, B. Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído. p. 193, 2006.

COLLISCHONN, B. et al. Desempenho do Satélite TRMM na estimativa de precipitação sobre a Bacia do Paraguai Superior. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 59, n. 1, 2007a.

COLLISCHONN, W. et al. The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 5, p. 878–895, out. 2007b.

COSTA, F. A. DA. Sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento de reservatório no semiárido do nordeste: Poço da Cruz, Pernambuco. 8 fev. 2019.

COSTI, A. C. Z. Avaliação de dados altimétricos de níveis de água adquiridos pelo satélite ENVISAT na bacia amazônica. p. 158, dez. 2012.

CPRM e ANA lançam logomarca para Rede Hidrometeorológica Nacional. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Noticias/CPRM-e-ANA-lancam-logomarca-para-Rede-Hidrometeorologica-Nacional-3417.html>>. Acesso em: 18 maio. 2020.

EMBRAPA. **Aqua - Portal Embrapa.** Disponível em: <<https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/aqua>>. Acesso em: 4 set. 2021.

FLAMING, G. Measurement of Global Precipitation. 1 set. 2004.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto.** 3. ed. [s.l: s.n.].

FUNK, C. et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, n. 1, p. 150066, 8 dez. 2015.

GERMANO, A. DE O.; PICKBRENNER, K. A Importância de Realizar Calibração, Aferição e Análise de Consistência de em Pluviômetros Automáticos. **XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, p. 10, 2019.

HIDROWEB - **ANA**. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>>. Acesso em: 7 out. 2020.

HUFFMAN, G. J. NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG). p. 30, 16 nov. 2015.

INPE. **LANDSAT**. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/documentacao/satelites/landsat>>. Acesso em: 2 set. 2021.

JARDIM, P. F. et al. A Modeling Assessment of Large-Scale Hydrologic Alteration in South American Pantanal Due to Upstream Dam Operation. **Frontiers in Environmental Science**, v. 8, 2020.

JUNIOR, D.; MARTINS, E.; NASCIMENTO, L. Avaliação do Algoritmo Evolutivo Mopso na Calibração Multiobjetivo do Modelo SMAP no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 1, p. 85–97, 2009.

KUMMEROW, C. et al. The Status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after Two Years in Orbit. **JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY**, v. 39, p. 18, 2000.

LOPES; BRAGA JR; CONEJO. Simulação hidrológica: aplicações de um modelo simplificado. v. 2, p. 42–62, 1981.

Mapbiomas Brasil | **Análise de Acurácia**. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/analise-de-acuracia>>. Acesso em: 11 ago. 2021.

Monitoramento — Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Capa. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/monitoramento>>. Acesso em: 20 out. 2020.

MORAIS, B. C. DE; BARREIROS, I. Z. A Gestão da Matriz Energética no Brasil: Uma Análise dos Últimos 20 Anos. p. 15, 2018.

MOREIRA, A. A.; FASSONI-ANDRADE, A. C. Balanço hídrico no Pantanal: uma abordagem por sensoriamento remoto. p. 10, 2018.

MOREIRA, D. Rede de Referência Altimétrica para Avaliação da Altimetria por Satélites e Estudos Hidrológicos na Região Amazônica. p. 175, mar. 2010.

NASA. **TRMM Instruments | NASA Global Precipitation Measurement Mission.** Disponível em: <<https://gpm.nasa.gov/missions/TRMM/satellite>>. Acesso em: 3 set. 2021.

OLIVEIRA, B. Monitoramento Hidrológico Transfronteiriço da Bacia Amazônica por Altimetria Espacial. p. 93, out. 2018.

PACA, V. H. DA M. Condições de Operação e Implantação de Estações da Rede Hidrométrica da Amazônia Oriental - Estado do Pará. p. 14, 2011.

PAPA, F. et al. Interannual variability of surface water extent at the global scale, 1993–2004. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, n. D12, p. D12111, 19 jun. 2010.

PAZ, A. et al. Large-scale modelling of channel flow and floodplain inundation dynamics and its application to the Pantanal (Brazil). **Hydrological Processes**, v. 25, p. 1498–1516, 30 abr. 2011.

PEREIRA, E. M. Análise de conflitos pelo uso da água relacionados à oferta e à demanda: Bacia do Rio Piracicaba - MG. p. 57, 2012.

PINHEIRO, A. EFEITOS DA CURVA-CHAVE SOBRE A CURVA DE PERMANÊNCIA DOS ESCOAMENTOS EM UMA BACIA AGRÍCOLA. **Revista de estudos ambientais**, n. 2, p. 7, 2008.

Portal do SNIRH :: Agência Nacional de Águas. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/>>. Acesso em: 19 nov. 2020.

Programa Nacional de Hidrologia - Monitoramento Hidrológico - SGB/CPRM. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Apresentacao/Programa-Nacional-de-Hidrologia-293.html>>. Acesso em: 16 jul. 2020.

RIOS, F. P. et al. Estudo Comparativo Entre Métodos de Medição de Vazão em Cursos D'Água. p. 12, 2011.

ROZANTE, J. R. et al. Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation over South America. **Weather and Forecasting**, v. 25, n. 3, p. 885–894, 1 jun. 2010.

SENAY, G. B. et al. Operational Evapotranspiration Mapping Using Remote Sensing and Weather Datasets: A New Parameterization for the SSEB Approach. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 49, n. 3, p. 577–591, 2013.

Serviço Geológico do Brasil divulga prognóstico sobre a vazante do rio Paraguai em 2020. Disponível em: <<https://www.cprm.gov.br/publique/Noticias/Servico-Geologico-do-Brasil-divulga-prognostico-sobre-a-vazante-do-rio-Paraguai-em-2020-6307.html>>. Acesso em: 21 dez. 2020.

SGB/CPRM. Rede Hidrometeorológica Nacional - (RHN) - SGB/CPRM. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Apresentacao/Rede-Hidrometeorologica-Nacional---RHN-304.html>>. Acesso em: 14 ago. 2020.

SGB/CPRM. Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência (RHNR) - SGB/CPRM. Disponível em:

<<https://www.cprm.gov.br/publique/Noticias/Workshop-em-Brasilia-reune-USGS%2C-ANA-e-CPRM-para-discutir-a-Rede-Hidrometeorologica-Nacional-de-Referencia-%28RHNR%29-6165.html>>. Acesso em: 16 nov. 2020.

SGB/CPRM - SACE - Sistema de Alerta de Eventos Críticos. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/sace/>>. Acesso em: 19 nov. 2020.

SMAP-DIA/SGB: Modelo hidrológico SMAP em passo diário. Disponível em: <<https://apps.cprm.gov.br/smap-dia> (Endereço alternativo: <https://msuassuna.shinyapps.io/smapdia/>)>. Acesso em: 28 out. 2020.

Sobre a ANA — Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ASCOM. Capa. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/regulacao/institucional/sobre-ana>>. Acesso em: 18 out. 2020.

SOUZA, V. A. S. DE. **Padrões e Tendências Hidroclimáticas de Chuva Identificados por Sensoriamento Remoto na Bacia do Rio Madeira - Amazônia.** [s.l.] UFRJ/COPPE, 26 ago. 2019.

STEFFEN, C. A. **Introdução ao Sensoriamento Remoto - INPEINPE**, , 2021. Disponível em: <<http://www3.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm>>. Acesso em: 31 ago. 2021

TEIXEIRA, A. H. Modelling evapotranspiration by remote sensing parameters and agro-meteorological stations. **IAHS-AISH Publication**, v. 352, p. 154–157, 1 jan. 2012.

TUCCI, C. E. M. **Management of Latin American River Basins: Amazon, Plata, and São Francisco.** United Nations University Press: Tokyo.: Asit K. Biswas, Newton V. Cordeiro, Benedito P.F. Braga, and Cecilia Tortajada, 1999.

UC SANTA BARBARA. **CHIRPS: Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations | Climate Hazards Center - UC Santa Barbara**. Disponível em: <<https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps/>>. Acesso em: 1 jun. 2020.

Usos da Água - Capítulo 3 - ANA. , 2017. Disponível em: <http://conjuntura.ana.gov.br/static/media/uso_agua.f9c46ece.pdf>. Acesso em: 15 out. 2020

VARELA, G. M. Um Sistema de Alerta para Monitoração, Divulgação e Coordenação de Atividades em Situações de Enchentes. p. 78, 26 fev. 2003.

WARREN, M. S. et al. Utilization of Thermal Remote Sensing in Water Resource Management. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 1, 2014.

WMO. Guide to Hydrological Practices. **Data Acquisition and Processing, Analysis, Forecasting and Others 140 Applications.**, v. 168, n. 5th edition, p. 770, 1994.

XAVIER, L. N. R. Modelagem Hidrológica com Aporte de Dados da Missão Espacial Grace: Aplicação a Bacias Brasileiras. p. 266, nov. 2012.