



**LUIZA MAX TAVARES**

**PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL E ANUAL POR SATÉLITE  
NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PANDEIROS**

**LAVRAS-MG  
2023**

**LUIZA MAX TAVARES**

**PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL E ANUAL POR SATÉLITE NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO RIO PANDEIROS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Marcelo Ribeiro Viola  
Orientador  
Dr. Rubens Junqueira  
Coorientador

**LAVRAS-MG  
2023**

**LUIZA MAX TAVARES**

**PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL E ANUAL POR SATÉLITE NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO RIO PANDEIROS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em: 19 de julho de 2023

Prof. Dr. Marcelo Ribeiro Viola  
Orientador  
Dr. Rubens Junqueira  
Coorientador

**LAVRAS-MG  
2023**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por toda força que Ele me proporcionou nos últimos meses, que foram os momentos que mais precisei.

À minha mãe, família, amigos e ao André Lefol, que me apoiaram durante toda a minha caminhada e me ajudaram de todas as formas possíveis para que eu pudesse chegar até aqui, essa conquista com certeza não é só minha.

Ao meu orientador Marcelo Ribeiro Viola e ao meu Coorientador Rubens Junqueira por aceitarem o convite de me orientar durante todo esse processo, por me guiarem nessa pesquisa e estarem sempre dispostos a sanar as dúvidas.

Agradecemos também ao projeto Pesquisa & Desenvolvimento da Agência Nacional de Águas e Energia Elétrica e Companhia Energética de Minas Gerais (P&D Aneel/Cemig GT-611).

## RESUMO

A precipitação por satélite é uma alternativa para estudos hidrológicos em bacias hidrográficas com escassez de dados monitorados em superfície. O *Global Precipitation Measurement* (GPM) é um projeto que visa a estimativa da precipitação por satélite e que utiliza o algoritmo *Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM* (IMERG). Neste contexto objetivou-se realizar a validação da precipitação por satélite IMERG mensal pelo método ponto a pixel a partir de dados observados em dois postos pluviométricos presentes na Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros (BHRP) e gerar mapas de precipitação mensal e anual. A validação foi realizada para o período de 2001 a 2020 a partir dos dados dos postos pluviométricos Várzea Bonita e Usina Pandeiros Montante, disponíveis no Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb) da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), a partir do erro médio (EM), raiz do erro médio quadrático (REMQ), percentual de viés (Pbias), coeficiente de correlação de Pearson (r) e gráfico de dispersão. Os resultados mostraram que o produto IMERG descreve adequadamente a sazonalidade da precipitação na BHRP. Na validação ponto a pixel com escala mensal observou-se que o IMERG superestimou a precipitação na bacia, tendo sido obtido para os postos Várzea Bonita e Usina Pandeiros Montante EM igual a 4,62 e 5,66 mm.mês<sup>-1</sup>, respectivamente, e Pbias igual a 0,86 e 17,60%, respectivamente. O REMQ foi de 68,10 e 38,00 mm.mês<sup>-1</sup> e o r de 0,84 e 0,95 para os postos de Várzea Bonita e Usina Pandeiros Montante, respectivamente. A precipitação média anual por satélite na bacia foi de 1.091 mm, sendo 90,4% no período chuvoso (outubro a março) e 9,6% durante a estiagem (abril a setembro), com os maiores índices pluviométricos nos meses de março (16,4%), novembro (17,9%) e dezembro (20,6%). Ao analisar a variabilidade espacial da precipitação na bacia foi possível observar que a lâmina precipitada apresentou maiores valores no noroeste da bacia nas proximidades do município de Chapada Gaúcha.

**Palavras-chave:** Validação Ponto a Pixel, GPM, IMERG, Pantanal Mineiro, Rio São Francisco

## ABSTRACT

Satellite precipitation is an alternative for hydrological studies in watersheds with a shortage of rainfall stations. The Global Precipitation Measurement (GPM) is a project that aims to estimate precipitation by satellite and uses the Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) algorithm. In this context, the objective of this study was to validate the monthly precipitation by the IMERG satellite using the point-to-pixel method based on data observed in two rainfall stations present in the Pandeiros River Basin (BHRP) and to generate monthly and annual precipitation maps. The validation was carried out for the period from 2001 to 2020 based on data from the Várzea Bonita and Usina Pandeiros Montante rainfall stations, available in the Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb) of the Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), based on the average error (EM), square root mean error (REMQ), percentage bias (Pbias), Pearson's correlation coefficient (r) and scatterplot. The results showed that the IMERG product adequately describes the seasonality of precipitation in the BHRP. In the point-by-pixel validation with a monthly scale, it was observed that the IMERG overestimated the precipitation in the basin, having been obtained for the Várzea Bonita and Usina Pandeiros stations EM values equal to 4.62 and 5.66 mm.month<sup>-1</sup>, respectively, and Pbias equal to 0.86 and 17.60%, respectively. The REMQ was 68.10 and 38.00 mm.month<sup>-1</sup> and the r were 0.84 and 0.95 for the Várzea Bonita and Usina Pandeiros Montante stations, respectively. The mean annual precipitation by satellite in the basin was 1,091 mm, 90.4% in the rainy season (October to March) and 9.6% in the dry season (April to September), with greater precipitation in the months of March (16, 4%), November (17.9%) and December (20.6%). When analyzing the spatial variability of precipitation in the basin, it was possible to observe that the precipitated layer presented higher values in the northwest of the basin, close to the municipality of Chapada Gaúcha.

**Keywords:** Point to Pixel Validation, GPM, IMERG, Pantanal Mineiro, São Francisco River

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	
<b>2 OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Objetivo Geral</b>	<b>3</b>
<b>2.2 Objetivos Específicos</b>	<b>3</b>
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>4</b>
<b>3.1 Monitoramento da precipitação em Bacias Hidrográficas</b>	<b>4</b>
<b>3.2 Precipitação estimada por Satélites</b>	<b>5</b>
<b>4 METODOLOGIA</b>	<b>8</b>
<b>4.1 Caracterização da Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros</b>	<b>8</b>
<b>4.2 Banco de dados de precipitação</b>	<b>11</b>
<b>4.3 Validação Ponto a Pixel e mapeamento da precipitação por satélite</b>	<b>12</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>14</b>
<b>5.1 Validação da precipitação IMERG pelo método Ponto a Pixel</b>	<b>14</b>
<b>5.2 Mapeamento da precipitação média mensal e anual</b>	<b>19</b>
<b>6 CONCLUSÃO</b>	<b>22</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>23</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A precipitação é importante no sistema hidrológico e seu monitoramento nas bacias hidrográficas é necessário para entender as mudanças no regime pluviométrico, que afetam a disponibilidade dos recursos hídricos (CARVALHO; LOPES; SILVA, 2019). Quando há uma alta precipitação, previsões precisas da vazão de um rio são importantes para evitar os danos decorrentes de enchentes, que podem colocar vidas e propriedades em risco. Quando há uma baixa precipitação, surgem as secas, que impactam na agricultura e colocam várias espécies em condições de risco. Desta forma pode-se perceber que as chuvas possuem não só um valor ambiental, mas possuem também um valor econômico, podendo afetar o agronegócio (KIDD; HUFFMAN, 2011).

Os pluviômetros são os aparelhos mais comumente utilizados no Brasil para o monitoramento da precipitação. Sua operação ocorre com intervalo diário nos postos pluviométricos (ALVES; VICTORIA, 2020). Contudo em muitas bacias hidrográficas a rede de postos pluviométricos tem baixa densidade, não sendo suficiente para a análise da variabilidade espacial da precipitação na bacia ou mesmo para quantificar adequadamente a precipitação média na bacia.

Neste contexto são conduzidas pesquisas que buscam outras formas de quantificação da precipitação. Uma dessas formas é a partir do uso de satélites orbitais, os quais disponibilizam uma grande variedade de produtos, com resoluções espacial e temporal cada vez mais detalhadas. A precipitação por satélite é estimada por algoritmos que relacionam a taxa de chuva de nuvens precipitantes à espessura e/ou temperatura de brilho das nuvens (VILA, 2011).

O programa GPM tem como objetivo melhorar as estimativas de precipitação por satélite. O GPM conta com uma constelação de satélites que captam as informações necessárias e que são processadas pelo algoritmo IMERG. Este algoritmo une as estimativas feitas pelo TRMM, projeto antecessor do GPM, com estimativas feitas pelo GPM até os dias atuais (NASA, 2022). Os dados são disponibilizados em diferentes versões, podendo ser utilizados de acordo com o objetivo da pesquisa. (GADÊLHA, 2018).

A Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros (BHRP) está localizada no norte de Minas Gerais, constituindo um afluente pela margem esquerda do rio São Francisco. A BHRP é uma Área de Preservação Ambiental (APA) e abriga um pantanal em seu baixo curso onde ocorre importante reprodução de peixes para o médio curso do rio São Francisco (BETHONICO, 2009). O estudo do regime de precipitação nesta bacia visa a contribuir com diversas pesquisas que são ali desenvolvidas visando a diferentes finalidades.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Validar os dados de precipitação mensal por satélite IMERG (*Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM*) entre 2001 e 2020 tomando como referência dados monitorados em dois postos pluviométricos com dados disponíveis no Hidroweb/ANA, e que estão inseridos na BHRP.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Elaborar mapas de precipitação por satélite IMERG considerando as médias mensais e anual no período de 2001 a 2020 e avaliar a variabilidade espacial da precipitação na bacia.

### **3 REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **3.1 Monitoramento da precipitação em bacias hidrográficas**

A precipitação representa o aporte de água nas bacias hidrográficas, podendo ocorrer na forma de chuva, garoa, orvalho, neve, granizo, entre outras (CARVALHO; BRUMATTI; DIAS, 2012), podendo ser classificadas quanto ao mecanismo de resfriamento do ar em convectivas, ciclônicas e orográficas (CARVALHO; SILVA, 2006).

O monitoramento da precipitação é essencial para subsidiar a gestão de recursos hídricos em ocasiões tais como a previsão de enchentes, estudos hidrológicos, monitoramento da ocorrência de secas, dentre outras. O monitoramento da precipitação pode ser realizado a partir da instalação de pluviômetros e pluviógrafos, enquanto que a estimativa pode se dar de forma indireta pela utilização de sensores, que é uma demanda de pesquisa recente (FONSECA, 2022).

O principal método de monitoramento da precipitação utilizado no Brasil é por meio de pluviômetros presentes nos postos pluviométricos. A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) mantém cerca de 4.600 postos pluviométricos instalados no país (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS-ANA, s.d.), havendo também outros órgãos com monitoramento relevante em termos do número de postos, tais como o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN).

Os pluviômetros podem ser convencionais ou automáticos. De acordo Silva, Gervilla e Von-Randow (2019) podem ser elaborados pluviômetros artesanais como uma alternativa a regiões com deficiência de estações pluviométricas ou mesmo para conhecimento pessoal, de modo a tornar mais acessível o monitoramento da precipitação. Os pluviômetros relacionam o volume de água precipitado com a área de coleta, obtendo dados que são mensurados em lâmina, geralmente em mm. A superfície de exposição de um pluviômetro varia de 200 cm<sup>2</sup> a 500 cm<sup>2</sup> (TUCCI, 1993; PINTO et al., 1967).

A operação do posto pluviométrico requer manutenção periódica pois pode haver crescimento de árvores, construções ou outros aparelhos instalados ao redor, impedindo que a chuva chegue adequadamente ao equipamento (GROISMAN; LEGATES 1994).

#### **3.2 Precipitação estimada por satélite**

A utilização de sensoriamento remoto é uma abordagem que engloba várias aplicações em nível orbital, como previsões de tempo, estudos de fenômenos oceânicos, detecção e

monitoramento de desastres naturais, queimadas, desmatamento, estimativas de safras agrícolas e estimativas de precipitação pluviométrica (FLORENZANO, 2007).

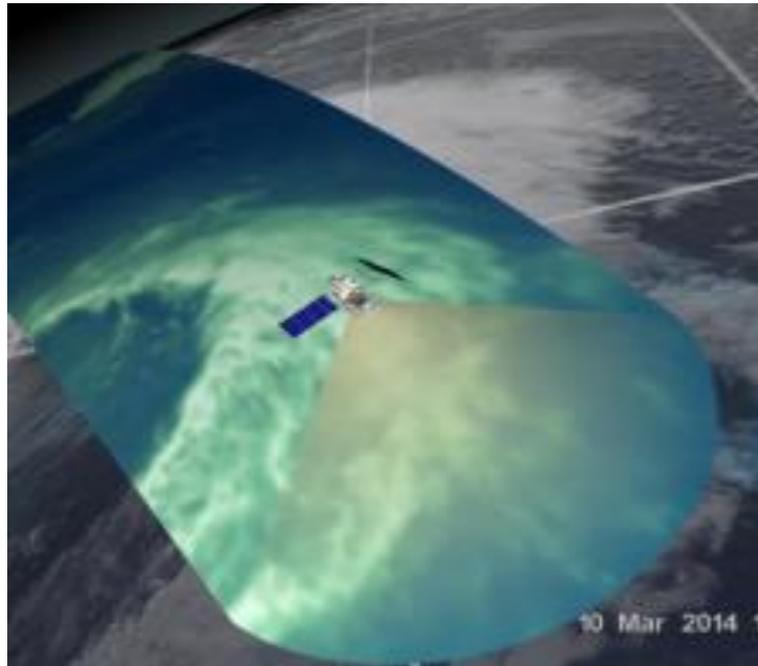
Os principais responsáveis por dados de sensoriamento remoto são os satélites, que possuem sensores capazes de captar imagens orbitais. O satélite geoestacionário é o mais utilizado para dados de precipitação, pois fornece dados atualizados de um mesmo ponto com maior frequência (ALMEIDA, 2017).

Diversas bandas espectrais são utilizadas na estimativa da precipitação por satélite. A faixa do infravermelho permite inferir a temperatura das nuvens, sendo possível associar baixas temperaturas a uma maior taxa de precipitação (COLLISCHONN et al., 2006). A faixa do visível possibilita a análise da espessura das nuvens, permitindo estimar o volume de água (PETTY, 1995). Já a utilização da faixa do microondas permite avaliar a presença de água nas nuvens por meio da interação com as partículas de água (JENSEN, 2009).

O *Global Precipitation Measurement (GPM)* é um projeto que se destaca nos estudos sobre precipitação, sendo realizado por duas agências espaciais: *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* e *Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)*. Sucessor da missão *Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM)*, o projeto GPM tem por objetivo a melhoria das estimativas de chuva e neve (FONSECA, 2022).

O satélite núcleo do GPM possui o *GPM Microwave Imager (GMI)*, um radar de microondas multicanal, com frequências de canais aprimorados variando de 10 GHz a 183 GHz. Ele possui uma varredura cônica de 885 km de largura, conforme ilustrado na Figura 1 (FONSECA, 2022). Além do satélite núcleo, o GPM conta com uma constelação de satélites que fornecem diversas outras medidas espectrais que são utilizadas na estimativa da precipitação (GADÊLHA, 2018).

Figura 1– Varredura cônica do radar GMI.



Fonte: NASA (2022).

O *Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG)* é o algoritmo que realiza as estimativas de precipitação por satélite no GPM, gerando produtos com resolução espacial de  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$  e com resolução temporal de 30 minutos. São disponibilizados três diferentes produtos denominados *Early Run*, *Late Run* e *Final Run*. O *Early Run* fornece os dados depois de 4 horas da passagem do satélite, o *Late Run* fornece depois de 12 horas e o *Final Run* fornece os dados após 4 meses de pós-processamento incluindo correções baseadas em observações e que melhoram a sua qualidade, sendo este último recomendado para utilização em pesquisas ambientais (GADÊLHA, 2018).

Previamente à utilização dos dados de precipitação estimados por satélite é importante a sua validação. Neste contexto pode ser utilizado o método de validação ponto a pixel, pois não há interpolação prévia de nenhuma estimativa, sendo os dados observados em superfície e os dados estimados por satélite comparados exatamente da forma como foram obtidos, permitindo a análise entre um ponto do pluviômetro e uma área de pixel (FEITOSA; OLIVEIRA, 2020).

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Caracterização da Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros

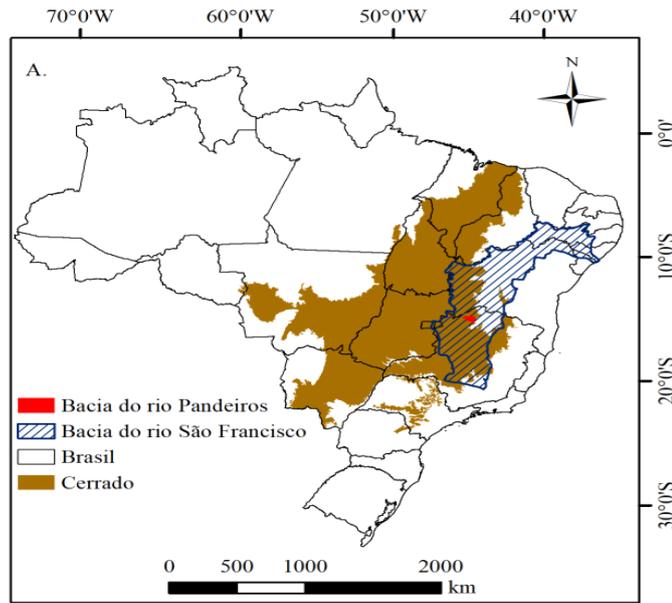
A Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros (BHRP) tem área de aproximadamente 3942 km<sup>2</sup> e está localizada no norte de Minas Gerais. Em 1995 a BHRP foi transformada em Área de Proteção Ambiental (APA Pandeiros) pela Lei Estadual 11.901 devido a sua relevância ecológica e pela presença do pantanal mineiro, onde ocorre importante reprodução da ictiofauna do trecho do rio São Francisco entre os reservatórios de Três Marias e Sobradinho (BETHONICO, 2009).

A Figura 2 mostra a localização da bacia. Ela se encontra na margem esquerda do Rio São Francisco, limitando-se com a Serra do Gibão (NW), com a Serra das Araras (SW), com o divisor de águas do rio Peruaçu até o São Francisco (NE) e com o divisor de águas da bacia do rio Pardo ao sul (S-SW) (BETHONICO, 2009).

A Figura 3 mostra os biomas presentes na BHRP e municípios. Observa-se que grande parte da bacia está inserida nos municípios de Januária e Bonito de Minas, e uma parte menor em Cônego Marinho. Observa-se também que a borda noroeste da bacia se encontra próxima do município de Chapada Gaúcha. No que diz respeito aos biomas a BHRP está quase inteiramente localizada no Cerrado, porém no extremo sudeste da bacia onde está localizado o pantanal ocorre o bioma Caatinga.

Na região da BHRP o regime pluvial é marcado por duas estações bem definidas, sendo verão chuvoso e um extenso período de estiagem contemplando o inverno e que pode chegar a seis meses. De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima predominante é o tropical de savana, classificado como clima semiárido do Cerrado. A vegetação primitiva exibe características de transição entre os biomas Cerrado e Caatinga (SILVA, 2018).

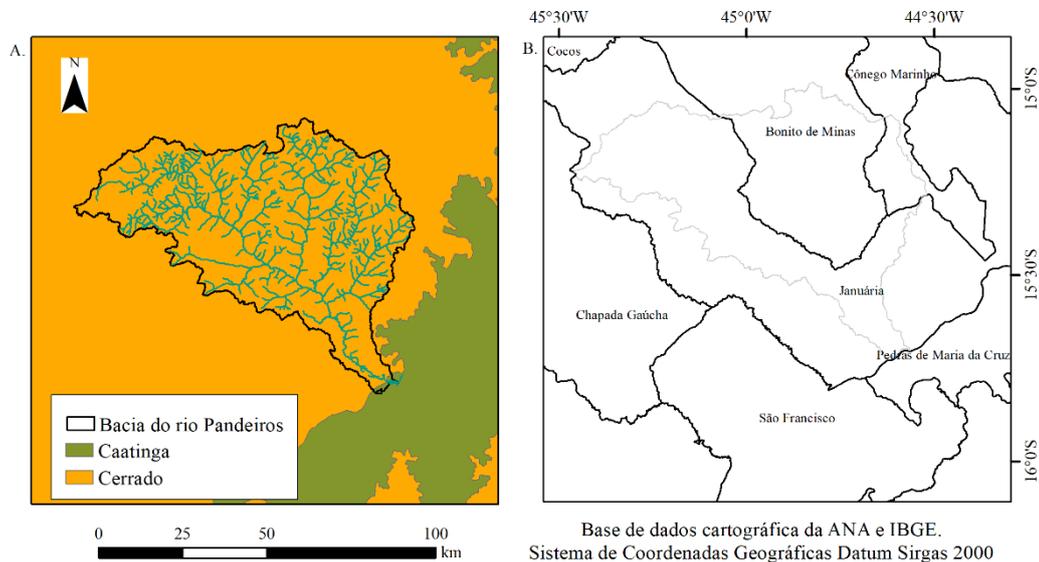
Figura 2– Inserção da Bacia do Rio Pandeiros no território brasileiro e na Bacia do Rio São Francisco.



Base de dados cartográfica da ANA e IBGE.  
Sistema de Coordenadas Geográficas Datum Sirgas 2000

Fonte: Do autor (2023).

Figura 3– Biomas presentes na Bacia do Rio Pandeiros (A) e municípios (B).



Base de dados cartográfica da ANA e IBGE.  
Sistema de Coordenadas Geográficas Datum Sirgas 2000

Fonte: Do autor (2023).

## 4.2 Banco de dados de precipitação

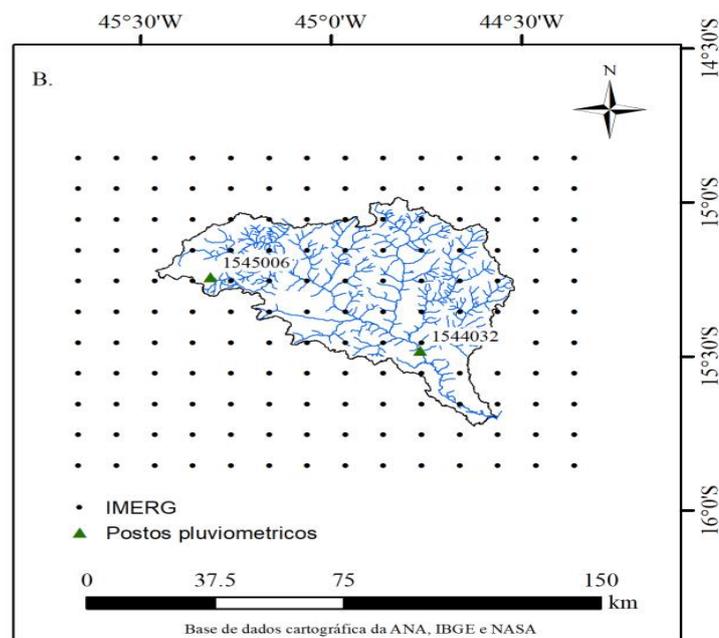
Os dados observados de precipitação, tidos como referência no presente estudo, são provenientes dos postos pluviométricos Várzea Bonita (código 1545006) e Usina do Pandeiros Montante (código 1544032), tendo sido obtidos no Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb) da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), disponível em <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>.

Após a obtenção das séries históricas de cada posto foi realizada a verificação de dados faltantes. Os meses de maio, agosto, setembro e outubro do ano de 2017 e o mês de fevereiro de 2019 foram retirados da análise do posto Várzea Bonita devido a falhas. Em seguida foram tabuladas as séries de precipitação mensal e anual para o período de 2001 a 2020.

Os dados do produto de precipitação por satélite IMERG Final Run V06 mensal foram obtidos no site da NASA (<https://gpm.nasa.gov/data/directory>), recobrando toda a área da BHRP. Para cada ponto do grid IMERG foram organizadas séries de precipitação mensal e anual abrangendo o mesmo período dos postos pluviométricos.

A Figura 4 mostra o grid de pontos do produto de precipitação por satélite IMERG e a localização dos postos pluviométricos Várzea Bonita (código 1545006) e Usina do Pandeiros Montante (código 1544032).

Figura 4 – Centro de pixel IMERG e postos pluviométricos ANA.



Fonte: Do autor (2023).

### 4.3 Validação Ponto a Pixel e mapeamento da precipitação por satélite

Para a validação da precipitação por satélite foi utilizado o método ponto a pixel. Neste método a validação toma como referência os dados observados no posto pluviométrico. Os dados de precipitação por satélite IMERG a serem validados são extraídos do pixel que recobre a localização do posto pluviométrico, visto que o produto IMERG tem resolução espacial de  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ . A vantagem deste método de validação é a utilização dos dados originais IMERG, não requerendo interpolação (Junqueira et al., 2022; Massagli et al., 2011).

A validação foi realizada por meio da comparação entre a precipitação observada nos postos pluviométricos (*obs*) e a precipitação por satélite IMERG (*est*), aplicando as seguintes métricas estatísticas: erro médio (*EM*), raiz do erro médio quadrático (*REMQ*), percentual de viés (*Pbias*), coeficiente de correlação de Pearson (*r*) e gráfico de dispersão em torno da reta 1:1.

O EM é a média das diferenças entre os dados observados e estimados (Equação 1). Valores negativos indicam subestimativa dos dados, enquanto valores positivos indicam superestimativa dos dados. Quanto mais próximo de zero, menor o erro (JUNQUEIRA et al., 2022a).

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^n (est_i - obs_i)}{n} \quad (1)$$

A REMQ mensura o desvio médio ao quadrado entre os dados do pluviômetro e os dados IMERG (Equação 2), sendo zero o valor ideal (FONSECA, 2022).

$$REMQ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (est_i - obs_i)^2}{n}} \quad (2)$$

O Pbias mede o desvio médio entre os dados do pluviômetro e os dados do IMERG, como mostra a Equação 3. Resultados positivos denotam superestimava, enquanto que resultados negativos denotam subestimativa, sendo zero o valor ideal.

$$Pbias = \frac{\sum_{i=1}^n (est_i - obs_i)}{\sum_{i=1}^n obs_i} \cdot 100 \quad (3)$$

O Coeficiente de Correlação de Pearson ( $r$ ) mede o grau de relação entre duas variáveis distintas (Equação 4). Quanto mais próximo de 1 maior é a relação proporcional entre as variáveis. Quanto mais próximo de -1 maior é a relação inversamente proporcional (BERNARDI, 2016). Segundo Dancey e Reidy (2005), se o valor de  $r$  estiver entre 0,10 e 0,30, o grau de dependência entre as variáveis é considerado fraco. Se estiver entre 0,40 e 0,60, é considerado moderado. E se estiver entre 0,70 e 1,00, é considerado forte.

$$r = \frac{(\underline{est-est})(\underline{obs-obs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\underline{est_i-est})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (\underline{obs_i-obs})^2}} \quad (4)$$

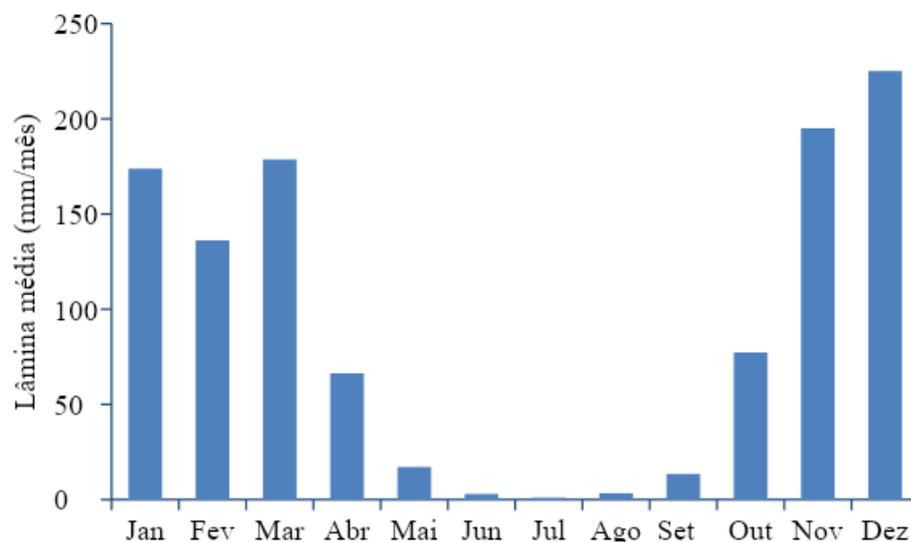
Tendo sido realizada a validação ponto a pixel do produto IMERG procedeu-se a elaboração de mapas de precipitação média mensal e anual para o período de 2001 a 2020. Para isto o grid de pontos IMERG foi interpolado por krigagem ordinária, gerando mapas de superfície.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Validação da precipitação IMERG pelo método ponto a pixel

No Gráfico 1 está apresentada a precipitação média mensal na BHRP calculada pela média dos pontos IMERG inseridos na bacia. Observa-se sazonalidade do regime pluvial, com os meses de outubro a abril com médias mensais superiores a 50 mm e com os meses de maio a setembro com média mensal bastante reduzida.

Gráfico 1– Precipitação média mensal da Bacia do Rio Pandeiros.



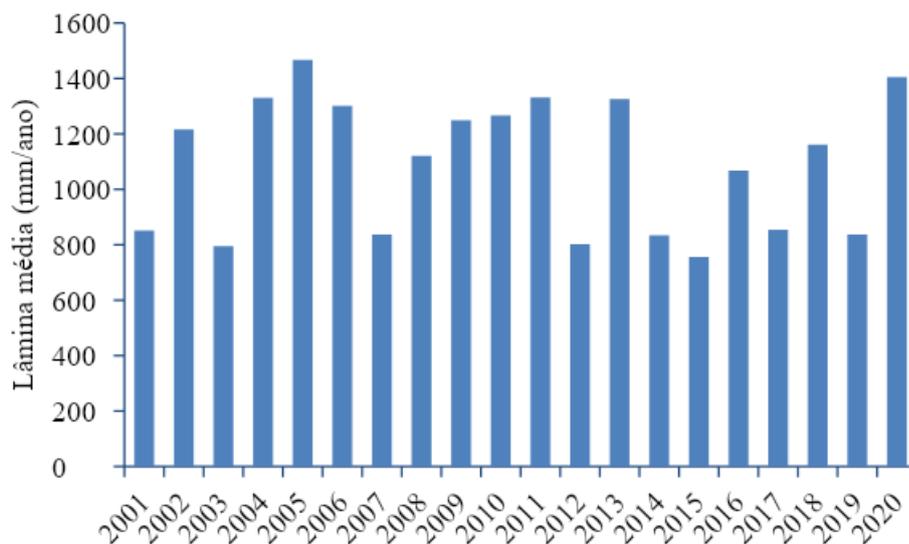
Fonte: Do autor (2023).

No Gráfico 2 está apresentada a precipitação anual IMERG na BHRP calculada pela média dos pontos IMERG inseridos na bacia. Observa-se grande amplitude de valores, com o mínimo de 755 mm em 2015 e máximo de 1468 mm em 2005, sendo a média de 1091 mm.ano<sup>-1</sup>. Durante o período chuvoso (outubro a março) ocorre cerca de 90,4% da lâmina média anual, enquanto na estiagem (abril a setembro) ocorre 9,6%, dos quais 6,1% são referentes ao mês de abril. Nas estações do ano, a precipitação fica dividida em 49,1% no verão (dezembro, janeiro e fevereiro), 24% no outono (março, abril e maio), 0,7% no inverno (junho, julho e agosto) e 26,2% na primavera (setembro a novembro). Esses resultados estão coerentes com os obtidos por Junqueira et al. (2020), que encontraram uma precipitação média para o ano hidrológico (outubro a setembro) de 1.085 mm, sendo 92% no período chuvoso (outubro a março).

Junqueira et al. (2020) analisaram as secas meteorológica e hidrológica na BHRP entre 1977 e 2018. A seca mais severa encontrada ocorreu entre os anos hidrológicos de 2014/15 e 2017/18, e foi verificado um agravamento da seca devido às temperaturas acima da média. A correlação entre as secas meteorológica e hidrológica defasadas em 0, 3, 6, 9 e 12 meses mostrou que a seca hidrológica é afetada principalmente pela precipitação dos últimos 6 meses.

Junqueira et al. (2022) aplicaram o modelo hidrológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) para a reanálise hidrológica de longo prazo (1950 a 2018) na BHRP, utilizando o produto de reanálise climática *ERA5-Land*. Os autores observaram um aumento na frequência de meses secos nas últimas décadas analisadas, sendo que o último terço do período analisado (1996-2018) concentrou 51,7% dos meses secos identificados.

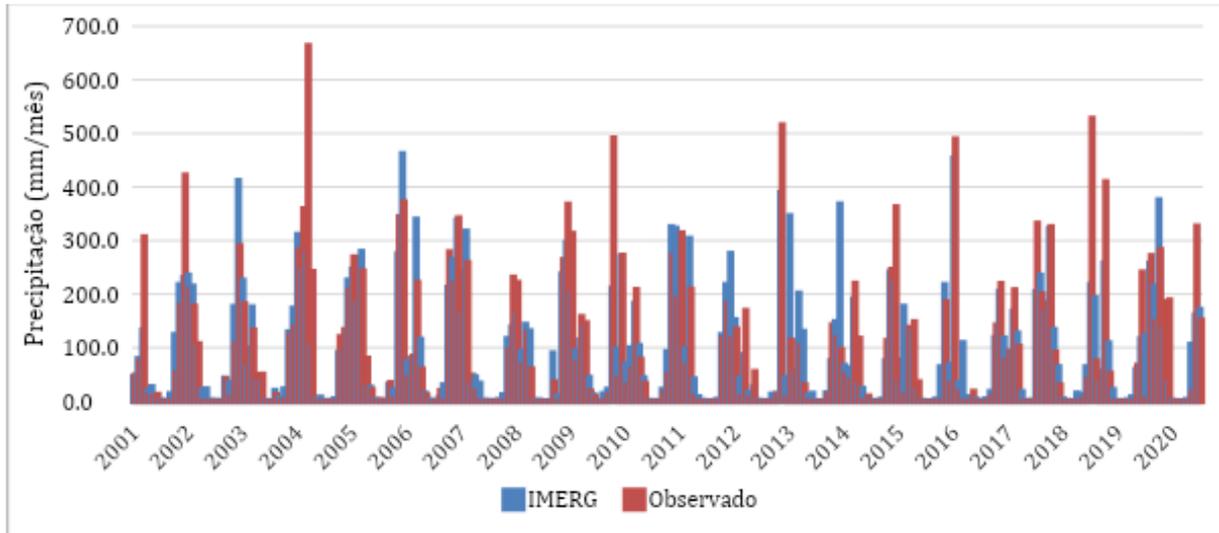
Gráfico 2– Precipitação anual da Bacia do Rio Pandeiros.



Fonte: Do autor (2023).

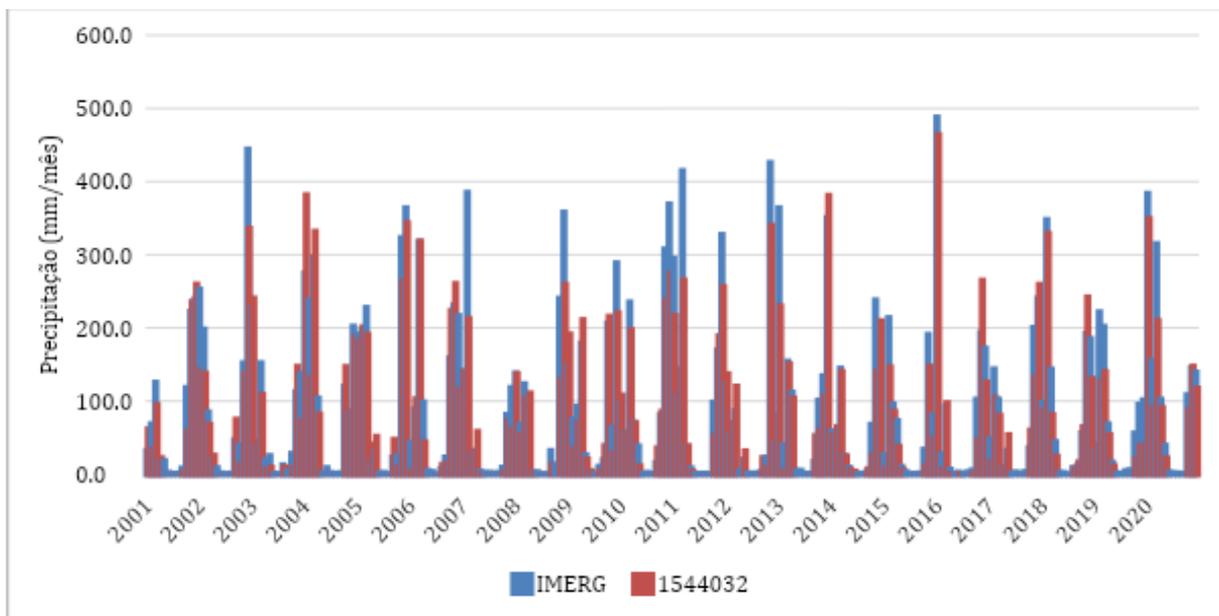
Os Gráficos 3 e 4 mostram os dados mensais de precipitação observada dos postos Várzea Bonita e Usina Pandeiros Montante, respectivamente, e os dados do pixel IMERG utilizados na validação ponto a pixel. Pode-se observar que os valores dos dados mensais estão coerentes ao longo do eixo horizontal dos gráficos, representado pelos anos de 2001 a 2020. Pode-se visualizar uma tendência de superestimativa do IMERG em alguns meses para a localização dos dois postos pluviométricos.

Gráfico 3– Dados de precipitação mensais do posto Várzea Bonita e do pixel IMERG no qual o posto está inserido.



Fonte: Do autor (2023).

Gráfico 4– Dados de precipitação mensais do posto Usina Pandeiros Montante e do pixel IMERG no qual o posto está inserido.



Fonte: Do autor (2023).

Na Tabela 1, estão apresentados os resultados das estatísticas. O erro médio (EM) e o percentual de viés (Pbias) indicaram superestimativa dos dados IMERG para a BHRP. O Pbias foi de 0,86% e 17,60% para os postos Várzea Bonita e Usina Pandeiros Montante, respectivamente. O EM foi de 0,81 e 13,31  $\text{mm.mês}^{-1}$  para os postos Várzea Bonita e Usina Pandeiros Montante, respectivamente. A dispersão dos dados em torno da reta 1:1 para os

postos Várzea Bonita e Usina Pandeiros Montante pode ser visualizada nos Gráficos 5 e 6, respectivamente. Junqueira et al. (2022a) realizaram a validação dos produtos de precipitação do IMERG e TMPA na BHRP pela metodologia ponto a pixel para o período de 2000 a 2018. Os autores encontraram superestimativa para ambos os produtos, com Pbias de 6,3% (IMERG) e 7,7% (TMPA) e EM de 4,62 mm.mês<sup>-1</sup> (IMERG) e 5,66 mm.mês<sup>-1</sup> (TMPA).

Tabela 1– Resultados das estatísticas utilizadas para validação do produto IMERG pelo método ponto a pixel.

<b>ESTATÍSTICA</b>	<b>Várzea Bonita</b>	<b>Usina Pandeiros Montante</b>
EM (mm.mês <sup>-1</sup> )	4,62	5,66
REMQ (mm.mês <sup>-1</sup> )	68,10	38,00
Pbias (%)	0,86	17,60
r	0,84	0,95

Fonte: Do autor (2023).

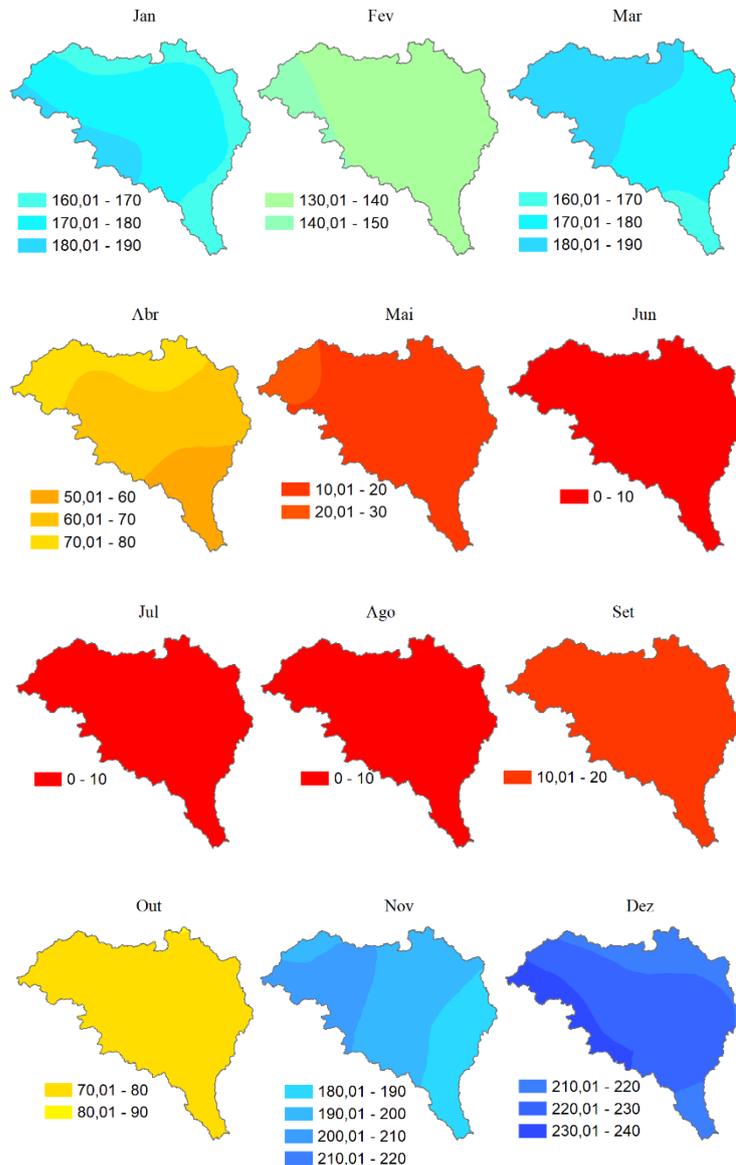
O coeficiente de correlação de Pearson (r) obtido foi de 0,84 e 0,95 para os postos Várzea Bonita e Usina Pandeiros Montante, respectivamente, enquanto que, a raiz do erro médio quadrático (REMQ) foi de 68,10 mm.mês<sup>-1</sup> e 38,00 mm.mês<sup>-1</sup>. Junqueira et al. (2022) obtiveram r igual a 0,88 (IMERG e TMPA) e REMQ igual a 56,94 mm.mês<sup>-1</sup> (IMERG) e 58,76 mm.mês<sup>-1</sup> (TMPA). Observa-se que os resultados obtidos no presente estudo com base no período de 2001 a 2020 são condizentes com os obtidos por Junqueira et al. (2022a) para o período de 2000 a 2018, indicando que os produtos de precipitação por satélite são promissores para avaliação do regime pluvial na BHRP.

## 5.2 Mapeamento da precipitação média mensal e anual

Para analisar a distribuição espacial da precipitação por satélite IMERG na BHRP foram confeccionados mapas mensais e anuais utilizando o interpolador krigagem ordinária aplicado ao grid de pontos do produto IMERG. Foram elaborados mapas de precipitação média mensal de janeiro a dezembro, com uma amplitude de classes de precipitação de 10 mm, e o mapa de precipitação média anual com amplitude de 50 mm. O mapeamento considerou as médias do

IMERG no período de 2001 a 2020. Os mapas de precipitação média mensal estão apresentados na Figura 5.

Figura 5– Mapas de precipitação média mensal IMERG.



Fonte: Do autor (2023).

Pode-se observar na Figura 5 que novembro e dezembro são os meses que possuem a maior lâmina precipitada, podendo variar de 180 a 220  $\text{mm.mês}^{-1}$  e de 210 a 240  $\text{mm.mês}^{-1}$ , respectivamente. Observa-se também pela Figura 5 que o período de estiagem tem seu ápice nos meses de junho, julho e agosto, com toda a área da bacia inserida na primeira classe de valores (0 a 10  $\text{mm.mês}^{-1}$ ), sendo que, conforme os valores médios para a bacia (Gráfico 1), o

momento mais crítico da estiagem ocorre especificamente no mês de julho, que tem média de  $1 \text{ mm.mês}^{-1}$ .

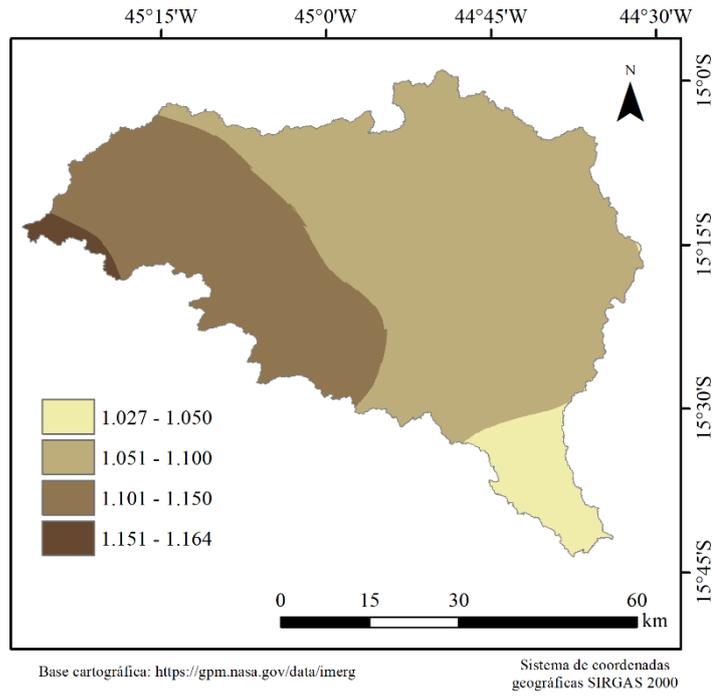
Analisando a distribuição espacial da precipitação nos meses do período chuvoso verifica-se que a região de maiores médias mensais ocorre no noroeste da bacia, com gradiente decrescente variando entre as direções noroeste-nordeste (janeiro, fevereiro e dezembro) e noroeste-sudeste (março, abril e novembro).

Na Figura 6 consta o mapa de precipitação média anual. Verificam-se valores entre  $1.027$  e  $1.164 \text{ mm.ano}^{-1}$ . Neste mapa, fica nítido um gradiente decrescente de precipitação na direção noroeste-sudeste, como também foi observado nos meses de março, abril e novembro. Também é possível observar que as menores lâminas de precipitação ocorrem na região do pantanal, nas proximidades do exutório do Rio Pandeiros. Ao analisar a ocorrência dos biomas na BHRP (Figura 3) nota-se que o extremo sudeste da bacia está localizado no bioma Caatinga, caracterizado por precipitação reduzida. Nesse sentido, a ocorrência dos biomas corrobora com o gradiente crescente de precipitação na direção sudeste-noroeste, visto que o Cerrado possui maiores índices pluviométricos, principalmente no verão.

Jardim e Moura (2018) estudaram a precipitação na BHRP e em alguns municípios do Norte de Minas Gerais. Os autores verificaram maiores índices pluviométricos na estação de Chapada Gaúcha ( $1028,9 \text{ mm.ano}^{-1}$ ), localizada no noroeste da bacia, e menores valores em Januária ( $898,3 \text{ mm.ano}^{-1}$ ), localizada a sudeste da bacia, o que está de acordo com os resultados do presente estudo.

Silva (2018) em estudo sobre a influência do fenômeno ENOS (*El Niño* Oscilação Sul) na BHRP, analisou, entre outros fatores, a correlação entre a precipitação e a temperatura da superfície do mar. Os resultados mostraram uma correlação fraca, sendo de  $0,20$ ,  $0,44$  e  $0,02$  para as fases positiva (*El Niño*), neutra e negativa (*La Niña*) do fenômeno ENOS, respectivamente.

Figura 6– Média anual das precipitações.



Fonte: Do autor (2023).

## **6 CONCLUSÃO**

Na validação ponto a pixel do produto IMERG na BHRP para o período de 2001 a 2020 foi verificado correlação forte com os dados observados, indicando que este produto de precipitação por satélite é uma alternativa válida para a análise da precipitação mensal na BHRP. Entretanto, com base nas estatísticas EM e Pbias foi verificado que o IMERG tende a superestimar a precipitação, sendo recomendado para estudos futuros sobre a variabilidade espacial da precipitação por satélite na BHRP a aplicação de metodologias de remoção de viés previamente ao mapeamento.

A análise da precipitação média na BHRP pelo produto de precipitação por satélite IMERG no período de 2001 a 2020 mostrou que a precipitação média anual foi de 1.091 mm, dos quais 90,4% ocorreram no período chuvoso (outubro a março) e 9,6% no período de estiagem (abril a setembro). Ao analisar a variabilidade espacial da precipitação foi possível observar que a lâmina precipitada apresentou maiores valores no noroeste da bacia nas proximidades do município de Chapada Gaúcha.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, K.N. **Análise de desempenho do satélite TRMM na estimativa de precipitação sobre a região hidrográfica do rio Itapemirim**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)- Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES. 2017. Disponível em: <<http://dspace3.ufes.br/handle/10/6894>>. Acesso em: 12 de jul.2023.
- ALVES, G.F; VICTORIA, D.C. Avaliação da precipitação estimada pelo GPM Late Run para estações meteorológicas no Brasil. *In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA*. 14., 2020. Campinas. [Anais...]. Campinas: EMBRAPA, Agricultura Digital, 2020. p.1-8. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1127729/avaliacao-da-precipitacao-estimada-pelo-gpm-late-run-para-estacoes-meteorologicas-no-brasil>>. Acesso em: 12 de jul.2023.
- BERNARDI, E.C.S. **Qualidade das estimativas de precipitação do satélite TRMM no estado do Rio Grande do Sul**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7658/BERNARDI%20c%20EWERTHON%20CEZAR%20SCHIAVO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 12 de jul.2023.
- BETHONICO, M.B.M. Rio Pandeiros: território e história de uma área de proteção ambiental no norte de minas gerais. **Revista Acta Geográfica**, n. 5, p.23-38, jan/jun. 2009. Disponível em: <<https://revista.ufrj.br/actageo/article/view/214>>. Acesso em: 12 de jul.2023.
- CARVALHO, A.P.V; BRUMATTI, D.V; DIAS, H.C.T. Importância do manejo da bacia hidrográfica e da determinação de processos hidrológicos. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, Viçosa, v.2, n.2, p.148-156, 2012. Disponível em: <<https://periodicos.ufv.br/rbas/article/view/2768/1252>>. Acesso em: 12 de jul. 2023.
- CARVALHO, A.A.C; LOPES, I; SILVA, O.F. Tendências Observadas na precipitação sobre a bacia do Riacho do Navio (Pernambuco). **Anuário IGEO**, v.42, n.4, 2019. Disponível em: <<https://ppegeo.igc.usp.br/index.php/anigeo/article/view/13491/1308427>>. Acesso em:12 de jul. 2023.
- CARVALHO, D.F; SILVA, L.D.B. Capítulo 4. Precipitação. *In: CARVALHO, D.F; SILVA, L.D.B. Hidrologia*, ago.2006. Disponível em: <<http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/HIDRO-Cap4-PPT.pdf>>. Acesso em: 12 de jul.2023.
- COLLISCHONN, B.; ALLASIA, D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. Estimativas de precipitação por sensoriamento remoto passivo: desempenho do satélite TRMM na bacia do alto Paraguai até Descalvados. *In: Simpósio de Geotecnologias no Pantanal*, 1. (GEOPANTANAL), 2006. [Anais...]. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2006. p. 47-56. Disponível em: <<http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2006/12.10.52/doc/p64.pdf>> . Acesso em: 12 de jul.2023.
- FEITOSA, J.R; OLIVEIRA, C.W. Estudo comparativo dos dados de precipitação do satélite TRMM e postos pluviométricos no estado do Ceará, Brasil. **Revista Geográfica de América**

**Central**, v.2, n. 65, p.257-280, 2020. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/journal/4517/451763485011/html/>>. Acesso em: 12 de jul. 2023.

FLORENZANO, T.G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 2.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 123p.

FONSECA, M.H.R. **Estimativa de precipitação por satélites: análise comparativa utilizando produtos IMERG e dados in situ para capitais nordestinas do Brasil**. 2022. Monografia (Bacharel em Ciências Ambientais)- Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. 2022. Disponível em: <<https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/69576>>. Acesso em: 12 de jul.2023.

GADÊLHA, A.N. **Análise da missão GPM (Global Precipitation Measurement) na estimativa da precipitação sobre território brasileiro**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB. 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/13132/1/Arquivototal.pdf>>. Acesso em: 12 de jul.2023.

GROISMAN, P. Y; LEGATES, D.R. The Accuracy of United States Precipitation Data. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.75, n.2, 1994. Disponível em: <[https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/75/2/1520-0477\\_1994\\_075\\_0215\\_tausp\\_2\\_0\\_co\\_2.xml#:~:text=Gauge%20measurements%20tend%20to%20be,from%205%25%20to%2040%25.](https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/75/2/1520-0477_1994_075_0215_tausp_2_0_co_2.xml#:~:text=Gauge%20measurements%20tend%20to%20be,from%205%25%20to%2040%25.)>. Acesso em: 12 de jul.2023.

Imerg Final Run. **Nasa**, s.d. Disponível em: <<https://gpm.nasa.gov/taxonomy/term/1417>>. Acesso em: 12 de jul.2023.

JARDIM, C.H; MOURA, F.P. Variações dos totais de chuvas e temperatura do ar na bacia do Rio Pandeiros, norte do estado de Minas Gerais-Brasil: articulação com fatores de diferentes níveis escalares em área de transição climática de cerrado para semiárido. **Revista Brasileira de Climatologia**, n.spe, nov.2018. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/61013>>. Acesso em: 12 de jul.2023.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009. 598p.

JUNQUEIRA, R *et al.* Hydrological modeling using remote sensing precipitation data in a Brazilian savanna basin. **Journal of South American Earth Sciences**, v.115, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0895981122000645>>. Acesso em: 12 de jul.2023.

JUNQUEIRA, R *et al.* Hydrological Response to Drought Occurrences in a Brazilian Savanna Basain. **MDPI**, v.9, n. 10, p.1-11, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2079-9276/9/10/123>>. Acesso em: 12 de jul.2023.

KIDD, C; HUFFMAN, G. Global Precipitation Measurement. **RMetS**, v.18. n.3, p.334-353, 2011. Disponível em: <<https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/met.284>>. Acesso em: 12 de jul.2023.

MASSAGLI, G.O; VICTORIA, D.C; ANDRADE, R.G. Comparação entre precipitação medida em estações pluviométricas e estimada pelo satélite TRMM. *In: Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica*, 5., 2011, Campinas. [Anais...]. Campinas: EMBRAPA Territorial, 2011. p.8. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/902484/comparacao-entre-precipitacao-medida-em-estacoes-pluviometricas-e-estimada-pelo-satelite-trmm>>. Acesso em: 12 de jul.2023.

PETTY, G. W. The status of satellite-based rain fall estimation. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, n. 1, p. 125-137, 1995. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0034425794000704>>. Acesso em: 12 de jul.2023.

PINTO, N. L.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J.A. **Hidrologia básica**. 1.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1976. 279 p.

Portal HidroWeb. **Agência Nacional de Águas**, s.d. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>>. Acesso em: 12 de jul.2023.

SILVA, C.G. **Caracterização física e ambiental da bacia hidrográfica do rio Pandeiros MG em eventos de El Niño-Oscilação Sul**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental e Agrícola)- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ. 2018. Disponível em: <<https://tede.ufrj.br/jspui/bitstream/jspui/4672/2/2018%20-%20Claudio%20Gomes%20da%20Silva.pdf>>. Acesso em 12 de jul.2023.

SILVA, L.A; GERVILLA, E; VON-RANDOW, R.C.S. Importância e confiabilidade de pluviômetros artesanais na medição da precipitação: métodos e aplicações. *In: WORKSHOP BRASILEIRO*, 11., 2019, São José dos Campos. **Anais [...]**. São Paulo: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019. Disponível em: <[http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/11.25.12.43/doc/silva\\_importancia.pdf](http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/11.25.12.43/doc/silva_importancia.pdf)>. Acesso em: 12 de jul.2023.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS: ABRH: EDUSP, 1993. 952 p.

VILA, D. Estimativa de Precipitação por Satélite. **Projeto Chuva**, 2011. Disponível em: <<http://chuvaproject.cptec.inpe.br/portal/saoluis/curso/daniel/precXsatelite1.pdf>>. Acesso em: 12 de jul.2023.