

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ANÁLISE DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO NA ÁREA DE DRENAGEM DO SISTEMA PRODUTOR CANTAREIRA ATRAVÉS DO SISTEMA DE SUPORTE A DECISÃO DA COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO

Walison de Carvalho¹

Abstract: Reliable precipitation data is essential for hydrological monitoring and water resource management. Traditionally, weather stations and radars are used for this purpose, but they present limitations in terms of spatial coverage and data availability. This study aimed to compare precipitation data observed by SABESP's telemetric stations with satellite-based estimates using the IMERG Final Run product from NASA's Global Precipitation Measurement (GPM) program. The study area covered the drainage basin of the Cantareira System, a major water supply source for the São Paulo Metropolitan Region. The analysis spanned from January 2015 to September 2024 and employed statistical methods including the coefficient of determination (R^2), Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NS), Willmott's concordance index (IC), and the relative error of precipitation volume (ERVP). Results indicated a strong correlation between observed and estimated data, with $R^2 = 0.986$, $NS = 0.938$, and $IC = 0.986$, showing excellent model performance. Despite minor local discrepancies, particularly in April and July, satellite-based precipitation data proved to be a viable alternative to ground-based measurements, especially in remote or inaccessible regions. Thus, IMERG/GPM products demonstrate strong potential for application in research projects, and policies aimed at water resource monitoring, particularly in water supply systems.

Resumo: A obtenção de dados confiáveis de precipitação é essencial para o monitoramento hidrológico e a gestão dos recursos hídricos. Tradicionalmente, estações meteorológicas e radares são utilizados para esse fim, mas apresentam limitações quanto à cobertura espacial e à disponibilidade de dados. Este trabalho teve como objetivo comparar dados de precipitação observados por estações telemétricas da Sabesp com as estimativas geradas por sensoriamento remoto via satélite, utilizando o produto IMERG Final Run do programa GPM da NASA. A área de estudo foi a bacia de drenagem do Sistema Produtor Cantareira, principal responsável pelo abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo. A análise foi realizada de janeiro de 2015 a setembro de 2024, utilizando métodos estatísticos como o coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS), índice de concordância de Willmott (IC) e erro relativo ao volume precipitado (ERVP). Os resultados apontaram alto grau de correlação entre os dados observados e estimados, com valores de $R^2 = 0,986$, $NS = 0,938$ e $IC = 0,986$, indicando excelente desempenho do modelo. Apesar de pequenas diferenças locais, principalmente nos meses de abril e julho, os dados satelitais mostraram-se uma alternativa viável às medições in situ, podendo complementar ou substituir os dados convencionais em áreas de difícil acesso. Assim, os produtos IMERG/GPM apresentam potencial para uso em projetos e políticas de gestão hídrica, especialmente no monitoramento de sistemas de abastecimento de água.

Palavras-Chave – Sensoriamento remoto, Estimativa de precipitação, IMERG

1) Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Divisão de Controle da Qualidade Capital. End: Rua Diego Calado, 149, São Paulo, SP, (11) 9 4110-3091. walisoncarvalho@sabesp.com.br

INTRODUÇÃO

A análise espaço temporal da precipitação desempenha um papel importante na melhoria da compreensão do ciclo global da água e do balanço de energia (KIDD; HUFFMAN, 2013; LIU, 2017). Estimativas precisas de precipitação são necessárias para a maioria dos modelos operacionais hidrológicos, climáticos ou meteorológicos como a entrada principal para fins de assimilação, calibração e validação. Além disso, observações de precipitação de também são usadas por pesquisadores em uma miríade de outros campos de estudo (AGHAKOUCHAK *et al.* 2011). Todos os tipos de sensores usados atualmente para estimar a precipitação têm seus pontos fortes e limitações no delineamento das características temporais e espaciais da precipitação, onde, tradicionalmente, as redes de monitoramento do clima, são a fonte mais confiável de observações de chuva e são usadas na maioria dos estudos como uma referência para comparar e validar os dados de estimativas de precipitação por satélite (TAPIADOR *et al.*, 2012).

No entanto, as redes de medição podem não capturar perfeitamente todos os detalhes de um evento em decorrência de diversas limitações, dentre elas podem ser citadas a baixa resolução espacial, problemas técnicos na geração de relatórios de dados e a falta de um sistema integrado de medidores (AGHAKOUCHAK *et al.*, 2011; SKOFRONICK-JACKSON *et al.*, 2017). Como alternativa as redes de medição, os radares meteorológicos podem fornecer o quantitativo de precipitação em tempo real em altas resoluções, mas eles também têm seus próprios tipos de erros, que podem afetar a precisão de seus produtos, como super/subestimação das quantidades de chuva, erros de truncamento e falta de redes de radar em escala global (SATGÉ *et al.*, 2017). Estimativas baseadas em satélites podem superar algumas dessas limitações por sua capacidade de capturar quantidades de precipitação e relatar dados continuamente para a maior parte do globo, especialmente aquelas áreas onde não é possível a instalação de redes de medição ou radares (LIU; XIE, 2017; CHEN; LI, 2016). No entanto, estes produtos também precisam ser calibrados e validados antes de serem usados operacionalmente (KIDD *et al.*, 2020).

Atualmente, a gestão sustentável dos recursos hídricos vem enfrentando desafios substanciais em todos os níveis, desde a escala local até a global. A comunidade climática internacional, por meio do *World Climate Research Programme*, identificou sete grandes desafios que deverão ser enfrentados nas próximas décadas, principalmente em relação ao nosso entendimento e capacidade de nos adaptarmos às mudanças climáticas. Quatro desses desafios estão relacionados diretamente à água presente na atmosfera, seja através de nuvens, circulação e sensibilidade climática, eventos climáticos extremos, água para a produção de alimentos e previsão do clima a curto prazo (SKOFRONICK-JACKSON *et al.*, 2017). Três questões básicas colocadas sob esses desafios são: como a disponibilidade de água doce mudará nas próximas décadas, qual é a previsibilidade das mudanças na frequência e intensidade dos eventos extremos, e como a convecção molda as respostas das nuvens? No centro dessas questões está a necessidade de melhores medições de precipitação, desde a observação de padrões globais até escalas locais, onde tem o impacto social mais profundo. Diante do acima exposto, este trabalho tem como objetivo a comparação dos dados de precipitação observado através de estações telemétricas com as estimativas de precipitação por satélite.

A utilização de satélites na estimativa de precipitação tem se tornado uma importante ferramenta para suprimir as limitações encontradas com o uso de pluviômetros ou estações meteorológicas (SKOFRONICK-JACKSON *et al.*, 2017; TEODORO *et al.*, 2020). Estas estimativas podem ser utilizadas para caracterizar mudanças no ciclo da água da Terra, quantificar fluxos e reservatórios de água doce e avançar na capacidade de previsão de desastres naturais e eventos climáticos extremos. Estas informações devem ser usadas sinergicamente com observações complementares para obter insights físicos sobre as complexas interações entre a água e outros

componentes do sistema terrestre (LIU; XIE, 2017). Lançado em 1997, o Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) foi o primeiro projeto de monitoramento de precipitações com a utilização de satélites, fruto da parceria entre a *National Aeronautics and Space Agency* (NASA) e a *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA), onde o objetivo específico do projeto era o monitoramento e estudo das precipitações nas regiões tropicais e subtropicais, além de verificar a influência de tais eventos no clima global (KUMMEROW *et al.*, 2000).

Em decorrência do sucesso do programa TRMM, houve a necessidade em manter as estimativas de precipitação através de sensoriamento remoto, uma vez que o TRMM foi encerrado em 2005 (LEMONS *et al.*, 2017). Para suprir tal demanda, foi lançado em 2014 o *programa Global Precipitation Measurement* (GPM), formado NASA e JAXA, que desenvolveram o GPM Core Observatory (GPM-CO) e também por um consórcio de agências espaciais internacionais, incluindo o *Centre National d'Études Spatiales* (CNES), a *Indian Space Research Organization* (ISRO), a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e a *European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites* (EUMETSAT) (DEZFULI *et al.*, 2017; KID *et al.*, 2020).

A fim de aumentar a capacidade de medição do programa GPM, o GPM-CO foi equipado com um radar de precipitação de dupla frequência (DPR) de banda Ku de 13,6 GHz e banda Ka de 35,5 GHz e um imageador de micro-ondas (GMI) de 13 canais, mais duas bandas de alta frequência adicionais em 165,5 GHz e 183,31 GHz (KIDD *et al.*, 2020). O GPM-CO é parte fundamental da missão GPM, sendo utilizado como padrão de referência de calibração e unificação dos dados de uma constelação internacional com aproximadamente 10 de satélites, como o indo-francês Megha-Tropiques, o europeu MetOp e os americanos DMSP, POES, Suomi NPP e o JPSS, que combinando as informações, melhoram a estimativa dos dados de precipitação (CHEN; LI, 2016; HOU *et al.*, 2014; HUFFMAN *et al.*, 2015).

Como parte do programa GPM, a NASA inclui um componente de validação de solo (GV) no algoritmo IMERG (*Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM*), sucessor do TMPA, que visa não apenas verificar e validar os produtos de precipitação gerados, mas também obter uma visão maior dos processos de precipitação observados pelos sensores GPM (JENSEN *et al.* 2016). O trabalho do GPM GV pode ser dividido em três áreas principais, a validação direta, a validação física e a abordagem integrada dos produtos depreciação (KIDD *et al.*, 2020). A validação direta dos produtos de precipitação é realizada por meio da comparação das estimativas de satélite com medições de precipitação coletadas rotineiramente por uma rede terrestres de radares (ZHANG *et al.* 2016; TAN *et al.*, 2017b).

A abordagem integrada, pela qual os produtos de precipitação estão relacionados a aplicações específicas para determinar os erros e incertezas associados, incluem a estimativa e medição da distribuição do tamanho da gota por diferentes sensores, buscando reconciliar as diferenças, a partir da compreensão física da precipitação e dos processos associados, e das diferenças nas técnicas de observação, através da identificação e redução de erros e incertezas na modelagem hidrológica (LIAO *et al.* 2014). Os produtos IMERG são disponibilizando em formato de grade de 0,1°, com diferentes resoluções temporais, de acordo com o produto final escolhido. Os dados IMERG Early, Late e Final Run são disponibilizados em vários formatos de dados com diferentes tipos de processamento, de modo que possa atender às necessidades da comunidade de usuários de dados hidrometeorológicos (ADHIKARI *et al.*, 2019; CHEN *et al.*, 2017; PRAKASH *et al.*, 2016; TANG *et al.*, 2016).

O IMERG-GPM integra várias recuperações de multissatélites do programa TRMM, como a calibração intersatélite e o ajuste de medição, além de diversas técnicas de estimativa de precipitação, como a NOAA *Climate Prediction Center Morphing Technique*, o *Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks* (PERSIANN) da Universidade da

Califórnia, que utiliza sensores de infravermelho calibrado por micro-ondas utilizando redes neurais artificiais; e o Sistema de Processamento de Precipitação da NASA (HUFFMAN *et al.*, 2015a,b; TAN; SANTO, 2018).

O IMERG contém estimativas de precipitação de sensores passivos de micro-ondas que estão a bordo de vários satélites da constelação GPM e os campos de infravermelho intercalibrados com correção do ângulo do zênite fundidos a partir de vários satélites geoestacionários (JANOWIAK *et al.*, 2001). As estimativas de precipitação por sensores passivos de micro-ondas são calculadas usando a versão 2014 do algoritmo de perfil de Goddard (KUMMEROW *et al.*, 2014; LIU, 2016).

A precipitação envolve processos físicos complexos e exibições da alta variabilidade espacial e temporal, sendo considerada um dos principais componentes do ciclo hidrológico, em decorrência do papel significativo que desempenha nas várias atividades socioeconômicas (TAPIADOR *et al.*, 2012). Estimativas precisas de precipitação são cruciais para uma ampla gama de aplicações de clima e hidrologia (PRAKASH *et al.*, 2016). Apesar de sua importância, em vários locais ao redor do mundo, a rede de monitoramento de precipitação apresenta limitações relacionadas à densidade, frequência de observações e infraestrutura (HOBOUCHIAN *et al.*, 2017).

No monitoramento hidrometeorológico, as estações pluviométricas (Figura 2) são as fontes mais comuns para a aquisição dados de precipitação (TAPIADOR *et al.*, 2012). No entanto, a densidade insuficiente de instrumentos, a distribuição desigual e cobertura espacial limitada de estações de observação de precipitação dificultam o uso dessas fontes para diversas aplicações, especialmente em regiões de difícil acesso (MEI *et al.*, 2014; CASSE *et al.*, 2015; ANJUM *et al.*, 2016). Outro sistema de monitoramento da precipitação é através de radares meteorológicos, porém os dados provenientes destes equipamentos possuem fontes de erros maiores que os pluviômetros, no entanto, permitem uma amostragem eficiente em escala temporal e espacial (BUENO; BOURSCHEIDT, 2019).

O Sistema de Suporte de Decisões (SSD) da Companhia de Saneamento Básico de São Paulo (Sabesp) foi inicialmente desenvolvido em 1998 como uma necessidade em se ter um banco de dados hidrológicos centralizado, com ferramentas que permitissem a consulta e análise rápida da situação dos mananciais que formam o sistema produtor metropolitano de São Paulo (FUMES *et al.*, 2011).

Nas últimas décadas, os produtos de precipitação baseados em informações de satélites foram aceitos como uma fonte auxiliar de dados para superar a limitação das técnicas de recuperação de precipitação baseada em instrumentos de medição in situ (TAN; DUAN, 2017; SATGÉ *et al.*, 2017; SHARIFI *et al.*, 2016). A aplicação desses produtos de precipitação em estudos hidrológicos, climatológicos, meteorológicos e diversos outros estudos científicos têm aumentado devido à fácil aquisição de dados, ampla cobertura espacial, alta resolução espaço-temporal, observações ininterruptas e acesso livre em tempo real (ZHAO *et al.*, 2017).

O desempenho de vários aspectos da estimativa de precipitação através do IMERG foi realizado em diferentes regiões do mundo. Liu (2016) analisou as estimativas do produto IMERG final run com as estimativas do produto TMPA (3B43) em escala global entre 2014 e 2015; Anjum *et al.* (2018) avaliaram o desempenho do IMERG no norte do Paquistão; Xu *et al.* (2018) realizaram a validação dos produtos GPM IMERG e TRMM 3B42V7 com base em uma rede pluviométrica de alta densidade no Planalto Tibetano Meridional.

No território brasileiro, Oliveira *et al.* (2016) avaliaram as características das estimativas de precipitação do IMERG sobre a Amazônia brasileira; Serrão *et al.* (2016) avaliaram as estimativas de precipitação da constelação GPM e do satélite TRMM na bacia hidrográfica do rio Solimões; Teodoro *et al.* (2020) analisaram as estimativas de precipitação diária do IMERG na bacia hidrográfica do rio

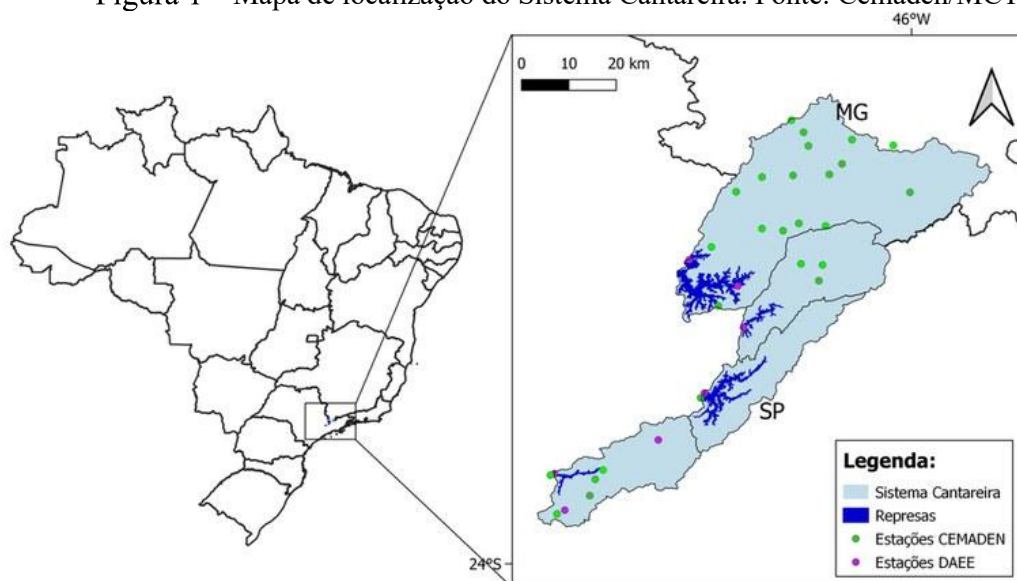
Sapucaí, nos estados de São Paulo e Minas Gerais. Já Bueno e Bourscheidt (2019) analisaram a estimativa de precipitação do GPM-IMERG na área de captação do Sistema Cantareira em São Paulo e Minas Gerais. Diante do acima exposto, este trabalho tem como objetivo a comparação dos dados de precipitação observado através de estações telemétricas com as estimativas de precipitação por satélite, permitindo a aferição e confiabilidade dados estimados.

3. METODOLOGIA

O Sistema Cantareira (Figura 1) está localizado ao norte da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), sendo a maior parte da sua área situada na bacia dos rios Piracicaba-Capivari-Jundiá (PCJ), fora dos limites da RMSP. O Sistema Cantareira possui um total de seis reservatórios, integrados por meio de túneis ou bombeamento e regularizados através de barragens, sendo cinco delas na região das nascentes da bacia do PCJ e um na bacia do Alto Tietê (Fontão; Zavattini, 2019). Dos 39 municípios que formam a RMSP, 31 pertencem ao Sistema Integrado Metropolitano (SIM) operado pela Companhia de Saneamento Básico de São Paulo (SABESP) e composto por sete sistemas produtores, sendo eles o Cantareira, Taiaçupeba, Alto Cotia, Guarapiranga, São Lourenço, Rio Claro, Rio Grande (ANA 2010; BAPTISTELLI *et al.*, 2018).

Os dados de precipitação observados foram fornecidos pela Sabesp, através do Sistema de Suporte a Decisão (SSD), que monitora diariamente as principais variáveis hidrológicas nos mananciais do Sistema Produtor de Água da RMSP. Os *shapefiles* dos reservatórios foram obtidos no portal da ANA (<https://metadados.snirh.gov.br/>); as bases cartográficas dos mananciais no portal de Infraestrutura de dados espaciais do Estado de São Paulo (<http://www.metadados.idesp.sp.gov.br/catalogo/srv/eng/catalog.search#/home>) e também no portal do IBGE (<https://www.ibge.gov.br/geociencias>).

Figura 1 – Mapa de localização do Sistema Cantareira. Fonte: Cemaden/MCTI



Para a comparação dos dados de precipitação estimada e observada, foi utilizado o método de ponto a pixel, propostos por Uddin *et al.*, (2008) e Chen *et al.*, (2013). Tal metodologia consiste em comparar a precipitação observada nas coordenadas geográficas das estações pluviométricas, com o pixel do GPM mais próximo a essa coordenada.

Os dados de precipitação estimada foram obtidos no portal *Interactive Online Visualization and Analysis Infrastructure* (GIOVANNI) do *Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center*, através do programa *Global Precipitation Measurement* no endereço eletrônico <https://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/>. Os valores de precipitação estimada foram decorrentes do produto *IMERG Final run versão 6*, com resolução espacial de 0,1° e resolução temporal de 30 dias. A data inicial dos dados de estimativa foi ajustada para janeiro de 2015 e a data final para setembro de 2024, sendo selecionada toda a área de drenagem do Sistema Produtor Cantareira.

Para o processamento das imagens foi utilizado o software QGIS® 3.24, onde as imagens salvas no formato netCDF (*Network Common Data Form*) foram convertidas em camada vetorial pelo algoritmo *r.to.vect*, obtendo deste modo, os pontos com os valores que representam o volume pluviométrico em cada pixel da imagem.

Na análise dos dados foram empregados os métodos estatísticos de precipitação estimada recomendados pela *International Precipitation Working Group* (IPWG), sendo eles o coeficiente de determinação (R^2), o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NS), o Índice de Concordância de Willmott (IC) e o Erro Relativo ao Volume Precipitado (ERVP).

O Coeficiente de Determinação (Equação 1) é definido como a relação que mede a proporção da variação total da variável dependente que é explicada pela variação independente. O R^2 é sempre um número positivo entre zero e um, que quanto maior for o R^2 , melhor será o poder de explicação da reta de regressão.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y} - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2} \quad (1)$$

Onde:

$\sum_{i=1}^n (\hat{y} - \bar{y})^2$: Variação explicada;

$\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2$: Variação não explicada.

O NS (Equação 2) foi proposto por Nash e Sutcliffe (1970) para a avaliação do desempenho de modelos hidrológicos, sendo posteriormente utilizado na calibração de modelos de precipitação estimada por satélite e averiguação da eficiência das duas estimativas de precipitação. Os resultados do NS podem variar de $-\infty$ a 1, sendo o valor 1, indicativo de um perfeito ajuste (GUILHON; ROCHA, 2007; KID *et al.*, 2003). De acordo com Silva *et al.* (2008), quando o valor de NS for menor que 0,75, o desempenho do modelo é considerado bom, para valores entre 0,36 a 0,75, o modelo é considerado aceitável, enquanto valores abaixo de 0,36 indicam que o modelo é considerável inaceitável. Conforme proposto por Serrão *et al.* (2016), valores acima de 0,90 indicam que o modelo pode ser considerado excelente.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (GPM - SSD)^2}{\sum_{i=1}^n (GPM - \bar{SSD})^2} \quad (2)$$

Onde:

GPM: Precipitação estimada;

SSD: Precipitação observada;

\bar{SSD} : Média da precipitação observada.

O IC (Equação 3) proposto por Willmott (1982), permite a avaliação dos desvios entre os valores de precipitação encontrados nos pluviômetros e a estimada pelos satélites. Este índice varia de 0 a 100%, onde, quanto menor o desvio, melhor será o desempenho do modelo avaliado.

$$IC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (GPM - SSD)^2}{\sum_{i=1}^n (|GPM - \overline{SSD}| + |SSD - \overline{SSD}|)^2} \quad (3)$$

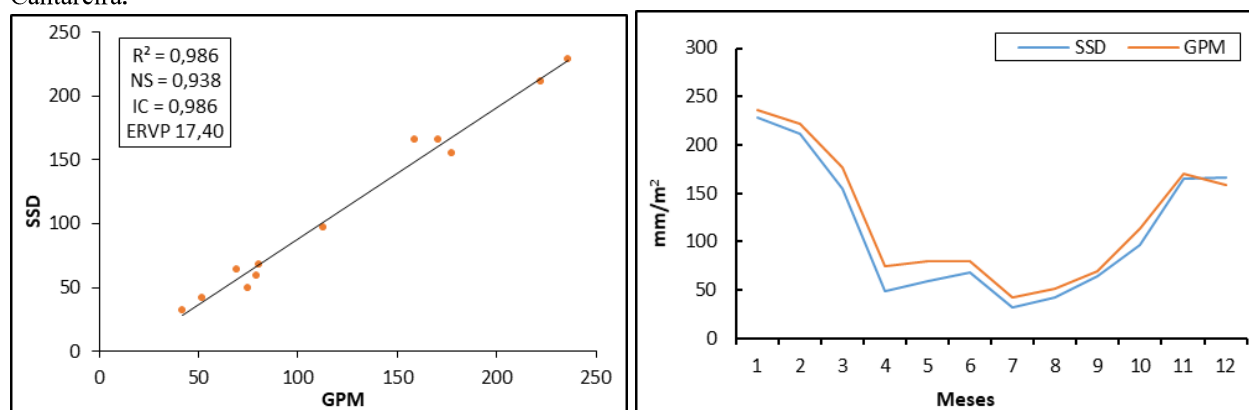
O ERVP (Equação 4) mede o quanto os dados observados e estimados estão próximos, sendo que o valor do ERVP menor que zero, indica que os dados estão subestimados e os valores acima de zero, que os dados estão superestimados.

$$ERVP = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (GPM - SSD)}{\sum_{i=1}^n SSD} \quad (4)$$

4. RESULTADOS PARCIAIS

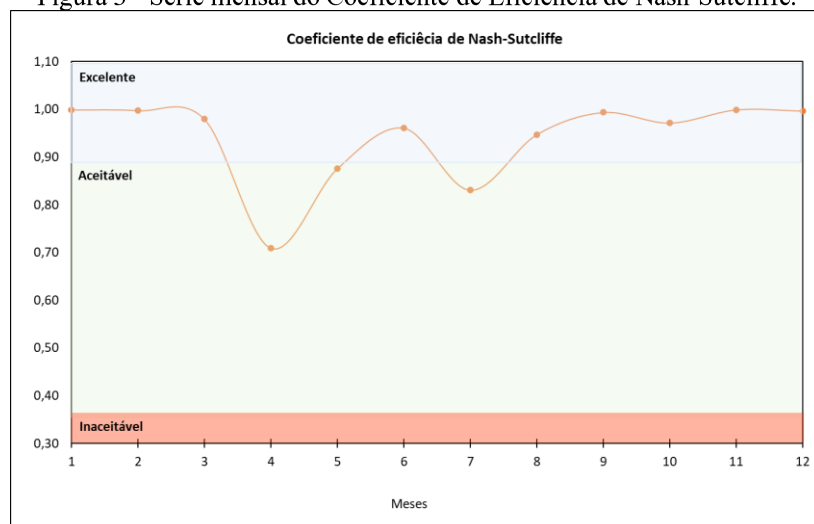
Os resultados das métricas estatísticas foram classificadas como excelente pelos critérios utilizados por Serrão et al. (2016), onde o R^2 ficou em 0,986, o NS em 0,938 e o IC foi de 0,986. O valor de ERVP do GPM foi levemente superestimado quando comparados ao SSD, o que acaba evidenciado pela diferença nos valores de precipitação no mês de abril. Na Figura 2 é possível observar que, embora possam determinar a tendência de variação mensal da precipitação, alguns dos pontos de monitoramento do GPM considerados neste trabalho exibiram erros significativos em comparação com as medições do SSD.

Figura 2- Série mensal e regressão linear dos dados estimados pelo GPM e os observados pelo SSD no Sistema Cantareira.



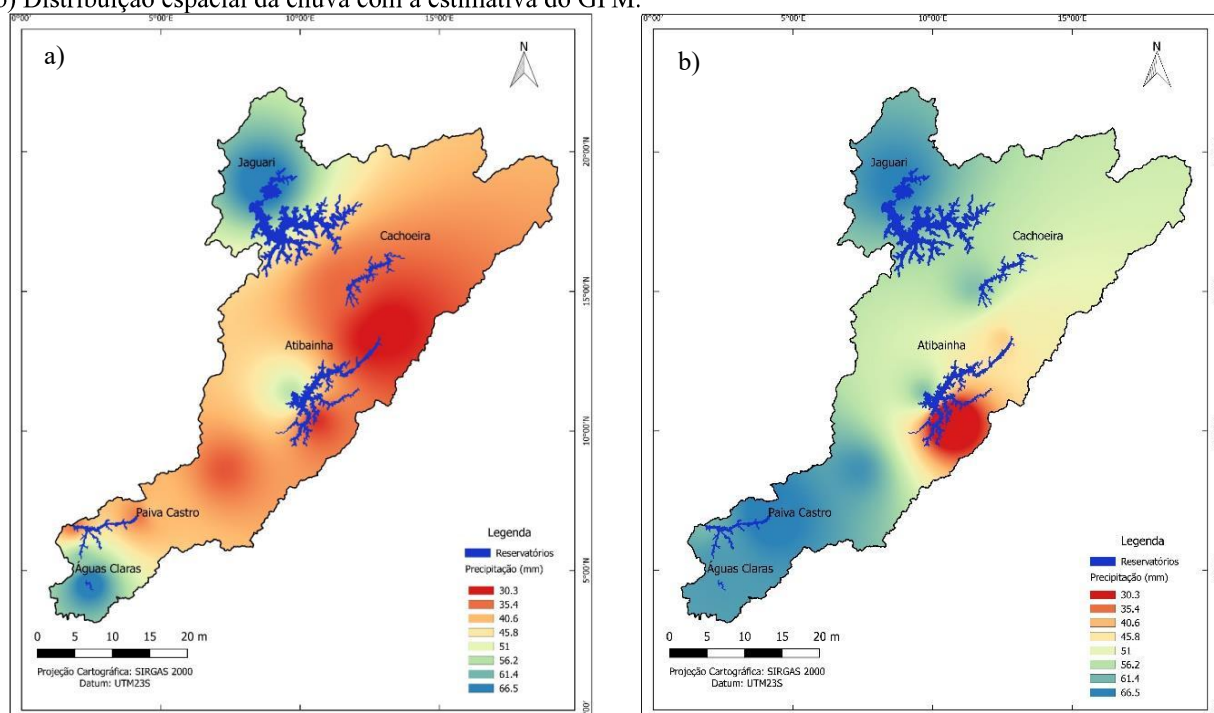
A Figura 3 apresenta o NS que somente os meses de abril e julho apresentaram valores aceitáveis, e nos demais meses, o NS foi considerado excelente.

Figura 3 - Série mensal do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe.



Na região central do Sistema, os quais abrangem as bacias hidrográficas dos rios Jacaré e Atibainha e no reservatório Paiva Castro, é possível verificar a diferença entre os valores de precipitação observado e estimados, já nos reservatórios Jaguari e Águas Claras estes valores foram mais coerentes (Figuras 4a e 4b). A diminuição do volume de precipitação no Sistema Cantareira, foi um dos principais fatores que acarretou a crise hídrica que assolou a Região Sudeste nos anos 2014/2015 e influenciou na redução do volume útil do Sistema entre os anos 2016 e 2019, conforme observam Bueno e Bourscheidt (2019) e Costa *et al.* (2019).

Figura 4a- Distribuição espacial da chuva na área do Sistema Cantareira no mês de abril de acordo com os dados do SSD e b) Distribuição espacial da chuva com a estimativa do GPM.



5. CONCLUSÃO

As estações meteorológicas de superfície apresentam dados reais de precipitação acumulada, porém não estão disponíveis para boa parte dos territórios e, por estarem sujeitas a uma série de falhas nos seus dados, podem não atingir um nível de eficiência desejado para determinado projeto. Deste modo, os dados de precipitação estimados por satélite ou outros sensores remotos, como o IMERG/GPM, são mais consistentes e tem se tornado uma opção viável quando o local de estudo não possibilita a implantação de estações de monitoramento ou apresenta alguma dificuldade de acesso.

Quando se analisa as variações espaciais da precipitação estimada pelo GPM *final run* com os dados do Sistema de Suporte de Decisões da Sabesp, verifica-se certa similaridade. Deste modo, pode-se sugerir a utilização desses produtos no desenvolvimento de estudos e projetos que visem utilizar a estimativa de precipitação por satélite, podendo inclusive contribuir no monitoramento de sistemas de captação de água para o abastecimento, devendo ser realizado em alguns casos a calibração do modelo para determinada região.

REFERÊNCIAS

- ADHIKARI, A.; LIU, C.; HAYDEN, L. “*Uncertainties of GPM microwave imager precipitation estimates related to precipitation system size and intensity*”. J. Hydrometeor., v. 20, p. 1907-1923, 2019.
- AGHAKOUCHAK, A.; BEHRANGI, A.; SOROOSHIAN, S. K. HSU. “*Evaluation of satelliteretrieved extreme precipitation rates across the Central United States*”. J. Geophysical Research: Atmospheres v. 116(D2), 2011.
- ANA. AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. “*Atlas Brasil. Abastecimento Urbano de água: resultados por estado*”, v. 2. Brasília, 2010.
- ANJUM, M.N. *et al.* “*Comparison of two successive versions 6 and 7 of TMPA satellite precipitation products with rain gauge data over Swat Watershed, Hindukush Mountains, Pakistan*”. Atmos. Sci. Lett. v. 17, n. 4, p. 270-279, 2016.
- ANJUM, M.N. *et al.* “*Performance evaluation of latest integrated multisatellite retrievals for Global Precipitation Measurement (IMERG) over the northern highlands of Pakistan*”. Atmospheric Research, v. 205, p. 134-146, 2018.
- BAPTISTELLI, S. C.; JANUARIO, G. F.; PRADO, F. R. L.; CAMPOS, M. R. F.; PAULI, D. R. “*Aumento da segurança hídrica para os sistemas de abastecimento público de água na RMSP no pós crise hídrica*”. Revista SANEAS, v.65, p. 25-33, 2018
- BUENO, J. O. A.; BOURSCHIEDT, V. “*Análise espaço-temporal das estimativas de precipitação do GPM/IMERG na área de captação do sistema Cantareira*”. XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Santos, SP. Abril, 2019.
- CASSE, C. *et al.* “*Potential of satellite rainfall products to predict Niger River flood events in Niamey*”. Atmos. Res. v. 163, p. 162-176, 2015.
- CHEN, Y.; EBERT, E. E.; WALSH, K. J. E.; DAVIDSON, N. E. “*Evaluation of TRMM 3B42 precipitation estimates of tropical cyclone rainfall using PACRAIN data*”. J. Geophys. Res. Atmos. v. 118, p. 2184-2196, 2013.
- CHEN, B.; LIU C.; MAPES, B. “*Relationships between large precipitating systems and atmospheric factors on a grid scale*”. J. Atmos. Sci., v. 74, p. 531-552, 2017

- DEZFULI, A.K. *et al.* “Validation of IMERG precipitation in Africa. J. of Hydrometeorology”, v. 18, p. 2817- 2825, 2017.
- FONTÃO, PAB; Zavattini, JA. “Variabilidade das chuvas anuais na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e no Sistema Cantareira: classificação e frequência dos anos-padrão”. Revista Brasileira de Geografia Física v.12, n.2, p. 457-469, 2019.
- FUMES, N. R.; WADA, C. T.; SCHARDONG. “Sistema de suporte a decisões da Sabesp”. In: 19º Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011, Maceió. Anais... Maceió, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2011.
- GADELHA, A.N. *et al.* “Grid box-level evaluation of IMERG over Brazil at various space and time scales”. Atmospheric Research, v. 218, p. 231-244, 2019.
- HOBOUCHIAN, M.P. *et al.* “Assessment of satellite precipitation estimates over the slopes of the subtropical Andes”. Atmos. Res., v. 190, p. 43-54, 2017.
- HUFFMAN, G.J. *et al.* “NASA global precipitation measurement (GPM) integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG)”. Algorithm theoretical basis Doc., version 4.5, 26 p. 2015a Disponível em: <http://pmm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/IMERG_ATBD_V4.5.pdf>.
- HUFFMAN, G.J. *et al.* “Integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG) technical documentation”. NASA Doc., 47 p., 2015b. Disponível em: <http://pmm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/IMERG_doc.pdf>.
- HUFFMAN, G.J. *et al.* GPM IMERG Precipitation final L3 1 month 0,1 grau x 0,1 grau V06, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). Disponível em: <[10.5067/GPM/IMERG/3BMES/06](https://data.goes.nasa.gov/GPM/IMERG/3BMES/06)>.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br>>.
- JANOWIAK, J.E.; JOYCE, R. J.; YAROSH, Y. “A real-time global half-hourly pixel-resolution infrared dataset and its applications”. Bull. Amer. Meteor. Soc., v. 82, p. 205-217, 2001.
- JENSEN, M.P. *et al.* “The mid-latitude continental convective clouds experiment (MC3E)”. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 97, p. 1667-1686, 2016.
- KIDD, C.; DAWKINS, E.; HUFFMAN, G. “Comparison of precipitation derived from the ECMWF operational forecast model and satellite precipitation datasets”. J. Hydrometeorology, v. 14, p. 1463-1482, 2013.
- KIDD, C. *et al.* “The Global Precipitation Measurement (GPM) Mission”. In: LEVIZZANI, V.; *et al.* (orgs). Satellite Precipitation Measurement Advances in Global Change Research, v. 67. Springer, Cham., 2020.
- KIM, J. E.; ALEXANDER, M. J. “Tropical precipitation variability and convectively coupled equatorial waves on submonthly time scales in reanalyses and TRMM.” J. Climate, v. 26, p. 3013-3030, 2013.
- LIAO, L.; MENEGHINI, R.; TOKAY, A. “Uncertainties of GPM DPR rain estimates caused by DSD parameterizations”. J. Applied Meteorology and Climatology, v. 53, p. 2524-2537, 2014.
- LIU, Z. “Comparison of Integrated Multisatellite Retrievals for GPM (IMERG) and TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) Monthly Precipitation Products: Initial Results”, J. Hydrometeorology, v. 17, n. 3, p. 777-790, 2016.

- LIU, W.T.; XIE, X. “Pre-monsoon drought in India observed from space”. J. Hydrometeorology, v. 18, p. 683- 692, 2017.
- KUMMEROW, C. *et al.* “Global Precipitation Measurement (GPM) mission. Algorithm Theoretical Basis Doc.”, version 1.4, 46 p, 2014a. Disponível em: <http://rain.atmos.colostate.edu/ATBD/ATBD_GPM>
- MEI, Y. W.; ANAGNOSTOU, E. N.; NIKOLOPOULOS, E. I.; BORGA, M. “Error analysis of satellite precipitation products in mountainous basins”. J. Hydrometeorol. v. 15, p. 1778-1793, 2014.
- NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.E. “River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles”. J. Hydrology, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.
- OLIVEIRA, R.; MAGGIONI, V.; VILA, D.; C. MORALES. *Characteristics and diurnal cycle of GPM rainfall estimates over the central Amazon region.* Remote Sens., v. 8, p. 544-550, 2016.
- PRAKASH, S.; MITRA, A.K.; PAI, D.S.; AGHAKOUCHAK, A. “From TRMM to GPM: How well can heavy rainfall be detected from space?” Adv. Water Resour., v. 88, p.1-7, 2016.
- SATGÉ, F. *et al.* “Comparative assessments of the latest GPM mission's spatially enhanced satellite rainfall products over the main Bolivian watersheds”. Remote Sens. v. 9, n. 4, p. 01-16, 2017.
- SHARIFI, E.; STEINACKER, R.; SAGHAFIAN, B. “Assessment of GPM-IMERG and Other precipitation products against gauge data under different topographic and climatic conditions in Iran: preliminary results”. Remote Sens. 8, v. 135, p. 01-24, 2016.
- SKOFRONICK-JACKSON, G. *et al.* “The Global Precipitation Measurement (GPM) mission's scientific achievements and societal contributions: reviewing four years of advanced rain and snow observations.” Quaterly Journal of the Meteorological Society, Supplement: Advances in remote sensing of rainfall and snowfall, v. 44., p. 27-48, 2018.
- TAN, M.L.; DUAN, Z. “Assessment of GPM and TRMM precipitation products over Singapore.” Remote Sens. v. 9, n. p. 720-727, 2017.
- TAN, M.L.; SANTO, H. “Comparison of GPM IMERG, TMPA 3B42 and PERSIANN-CDR satellite precipitation products over Malaysia”, Atmospheric Research, v. 202, p. 63-76, 2018.
- TAN, B.-Z *et al.* “Evaluation of global precipitation measurement rainfall estimates against three dense gauge networks”. J. Hydrometeorology, v. 19, p. 517-532, 2017b.
- TANG, G.; MA, Y.; LONG, D.; ZHONG, L.; HONG, Y. “Evaluation of GPM Day-1 IMERG and TMPA version-7 legacy products over mainland China at multiple spatiotemporal scales.” J. Hydrol., v. 533, p. 152-167, 2016.
- TAPIADOR, F.J. *et al.* “Global precipitation measurement: methods, datasets and applications.” Atmos. Res. v. 104-105, p. 70-97, 2012.
- WILLMOTT, C.J. “Some comments on the evaluation of model performance”. Bull. Am. Meteorological Society, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, 1982.
- ZHANG, J. *et al.* “Multi-Radar Multi-Sensor (MRMS) quantitative precipitation estimation: Initial operating capabilities”. Bull. American Meteorological Society, v. 97, p. 621-638, 2016.
- ZHAO, Y.; XIE, Q.; LU, Y.; HU, B. *Hydrologic Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis for Nanliu River Basin in Humid Southwestern China.* Nature: Scientific Reports. 7. p. 2470, 2017.