

Rafaela Melissa Andrade Ferreira

Licenciada em Geografia pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), mestre em Geografia pela Universidade Federal do Paraná e doutoranda em Geografia na Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP/Presidente Prudente)
rafaela.andrade-ferreira@unesp.br

Validação dos dados de precipitação pluvial observada e estimada por satélite no município de Ourinhos-SP

Resumo

Este estudo teve como objetivo avaliar a acurácia das estimativas de precipitação do produto satelital NASA/POWER em comparação com dados observados por estação pluviométrica no município de Ourinhos (SP). Foram utilizados dados diários de precipitação provenientes do Departamento de Água e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE) e estimativas do sistema NASA/POWER, permitindo a comparação entre as duas fontes de informação. A validação foi realizada por meio do coeficiente de determinação (R^2), erro médio (ME) e erro quadrático médio (RMSE). Também foram aplicadas análises sazonais, interdecadais e por classes de intensidade de precipitação definidas por quartis. Para avaliar a distribuição mensal dos erros entre os dados observados e estimados, utilizou-se a técnica gráfica Box Plot. Os resultados indicaram correlação fraca entre os dados observados e estimados, especialmente no verão e no outono, evidenciando tendência de subestimação das chuvas mais intensas. A análise interdecadal mostrou leve melhoria no desempenho do modelo ao longo do tempo. Entretanto, a avaliação por quartis indicou maiores erros nos eventos de precipitação mais intensa, com baixa capacidade explicativa do modelo. A distribuição mensal dos erros evidenciou subestimação predominante nos meses mais chuvosos, principalmente entre janeiro e março. Conclui-se que, apesar de avanços nas estimativas ao longo das décadas, o produto NASA/POWER ainda apresenta limitações na representação de eventos extremos de precipitação em escala diária na área de estudo.

Palavras-chave: Chuvas, Estimativas, Quantificação, Climatologia aplicada.

Abstract

VALIDATION OF OBSERVED AND SATELLITE-ESTIMATED RAINFALL DATA IN THE MUNICIPALITY OF OURINHOS-SP

This study aimed to evaluate the accuracy of precipitation estimates from the NASA/POWER satellite product compared with rainfall data observed at a rain gauge station in the municipality of Ourinhos, São Paulo, Brazil. Daily precipitation data from the Department of Water and Electric Energy of the State of São Paulo (DAEE) and estimates from the NASA/POWER system were used, allowing a comparison between the two sources of information. The validation was performed using statistical performance metrics, including the coefficient of determination (R^2), mean error (ME), and root mean square error (RMSE). Seasonal, interdecadal, and rainfall intensity analyses based on quartiles were also applied. To assess the monthly distribution of errors between observed and estimated data, the Box Plot graphical technique was used. The results indicated weak correlation between observed and estimated data, particularly during summer and autumn, revealing a tendency to underestimate more intense rainfall events. The interdecadal analysis showed a slight improvement in model performance over time. However, the quartile-based evaluation indicated larger errors for high-intensity precipitation events, with low explanatory capacity of the model. The monthly error distribution showed a predominance of underestimation during the rainiest months, especially from January to March. It is concluded that, despite gradual improvements over the decades, the NASA/POWER product still presents limitations in representing extreme precipitation events at the daily scale in the study area.

Key-words: Rainfall, Estimates, Quantification, Applied Climatology.

1. Introdução

A precipitação é uma variável essencial na regulação do clima terrestre, tendo em vista sua capacidade de interferir na maioria dos processos hidrológicos. Nesse sentido, compreender e monitorar o comportamento das chuvas ao longo de ciclos torna-se fundamental para a gestão ambiental de vários ecossistemas. Assim, quanto maior for a disponibilidade de dados pluviométricos, principalmente em escalas mais refinadas, maior será a confiabilidade das análises em Climatologia. Dessa forma, a utilização de longas séries históricas fornece as bases fundamentais para a compreensão da variabilidade e das tendências no tempo e no espaço (CHRISTOFOLETTI, 1992).

Segundo Varejão-Silva (2006), o comportamento das chuvas está intrinsecamente ligado à variabilidade temporal e espacial da precipitação,

destacando-se como um dos elementos fundamentais na caracterização climática de uma região. Com isso, não se resume apenas aos volumes totais precipitados, mas também à sua distribuição ao longo do ano, com períodos definidos de maior ou menor frequência e intensidade. Em adição, a análise pluviométrica deve considerar tanto os atores dinâmicos, como as massas de ar e os sistemas atmosféricos atuantes, quanto os fatores geográficos, como relevo, latitude e proximidade de grandes corpos d'água (MONTEIRO, 1962; 1971; ZAVATTINI, 2000; FONTÃO, 2021).

Entretanto, a medição precisa da precipitação ainda representa um desafio significativo, especialmente em países de grandes dimensões territoriais e com elevada diversidade climática, como o Brasil (DUARTE, 2020). A cobertura insuficiente de estações pluviométricas e os vazios observacionais ainda persistentes dificultam análises detalhadas em escala regional (BIER, 2017; BRUBACHER, 2020). Outra problemática é que regiões com relevo acidentado, serras, vales ou transições climáticas abruptas apresentam alta variabilidade espacial da precipitação, o que dificulta a interpolação e o preenchimento confiável dos dados ausentes (TAVARES et al., 2025).

É sob esse contexto, então, que os modelos de reanálise e os produtos satelitais surgem como alternativas importantes para suprir as lacunas observacionais, fornecendo dados contínuos e espacialmente abrangentes, muitas vezes com acesso gratuito e em tempo real. Mas, estudos como os de López-Bermeo et al. (2022), Uliana et al. (2024), Tórnio e Kede (2024), dentre tantos outros, reiteram a necessidade de aplicar mecanismos de validação e calibração desses produtos para seu uso adequado nas pesquisas científicas. Além do mais, um dos principais desafios desses produtos está relacionado à sua capacidade de representar adequadamente os eventos extremos de precipitação, como chuvas intensas e rápidas, frequentemente associadas a sistemas convectivos.

É, justamente, nas escalas finas de análise que se encontram as maiores ausências em termos de dados pluviométricos, o que representa um grande desafio para estudos hidrológicos, meteorológicos e climáticos. Essa carência de dados em resoluções espaciais mais refinadas compromete diretamente a qualidade das análises, pois a precipitação apresenta grande variabilidade mesmo em curtas distâncias, especialmente em áreas com características

topográficas complexas ou forte influência de fenômenos atmosféricos locais (JOHNSON, 1995; SHETTY; UMESH; SHETTY, 2022; MARTINS et al., 2023).

Diante desse cenário, torna-se fundamental a busca por metodologias que minimizem as limitações associadas à baixa disponibilidade de dados em escalas finas. Vê-se, portanto, que a integração de múltiplas fontes de informação, como redes de estações terrestres, dados de satélite e produtos de modelagem climática, pode melhorar significativamente a estimativa de precipitação. Conforme Moreno-Martínez et al. (2018), técnicas de interpolação espacial mais avançadas, baseadas em aprendizado de máquina e estatísticas geoespaciais, têm se mostrado promissoras para preencher lacunas observacionais com maior acurácia.

Com base nas discussões levantadas, o principal objetivo deste artigo foi o de realizar uma análise comparativa entre os dados pluviométricos observados pelo DAEE para o município de Ourinhos e os dados estimados pelo produto *NASA/POWER*, focando na escala diária de precipitação. A validação desses dados, por meio da comparação entre as fontes de informações, foi necessária para avaliar a confiabilidade e a precisão dos produtos satelitais em representar o comportamento da precipitação local, grande motivação para a elaboração do presente estudo.

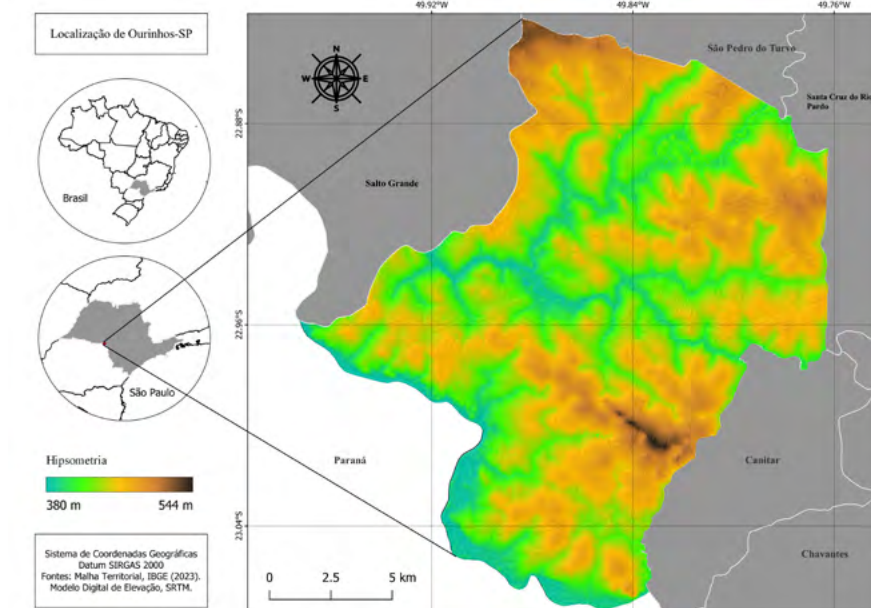
2. Caracterização da área de estudo

A cidade de Ourinhos está situada no oeste do estado de São Paulo (figura 1), próxima à divisa com o Paraná. Além disso, está aproximadamente a 370 km da capital paulista. Com uma extensão territorial de 296 km², a cidade tinha, segundo o Censo Demográfico de 2022 realizado pelo IBGE, uma população de 103.970 habitantes.

O clima em Ourinhos é tropical, com uma estação seca mais marcada no inverno e um verão chuvoso. Esse padrão está diretamente relacionado à atuação alternada das massas de ar ao longo do ano. A Massa Tropical Atlântica (Ta) exerce forte influência na região, avançando do setor leste do estado para o interior. Esse fluxo de ar quente e úmido desloca-se do litoral rumo às áreas continentais, interagindo com serras e relevos mais elevados, que podem favorecer ou dificultar sua progressão.

Figura 1

LOCALIZAÇÃO DA CIDADE DE OURINHOS E CARACTERÍSTICAS HIPSOMÉTRICAS DO MUNICÍPIO



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Outra massa de ar relevante é a Massa Tropical Continental (Tc), cuja atuação é mais frequente durante períodos de maior aquecimento. Formada sobre o interior do Brasil, ela transporta ar quente e relativamente seco das regiões centrais em direção ao oeste paulista, contribuindo para condições de menor umidade, especialmente na estação seca.

A Massa Equatorial Continental (Ec) também pode influenciar a região de forma eventual. Originada nas áreas úmidas da Amazônia, sua atuação em São Paulo ocorre principalmente em episódios de forte instabilidade atmosférica, embora seja menos frequente quando comparada às demais massas de ar.

De acordo com Perusi et al. (2022), Ourinhos integra a 11ª Região Administrativa de Marília e é integrante do Comitê da Bacia Hidrográfica do Médio Paranapanema (CBH-MP), Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 17 (UGRHI 17), com destaque para os rios principais, o Pardo e o Turvo. Ademais, o município está localizado na Unidade Geotectônica da Bacia Sedimentar do Paraná, pertencente ao Grupo São Bento, Formação Serra Geral.

No que se refere às características geológicas, a principal rocha magmática extrusiva é o basalto de textura afanítica, caracterizado por minerais extremamente finos, que se desintegram formando solos predominantemente compostos por argila (IPT, 1981). Conforme Ross e Moroz (1997), a área em questão integra a morfoescultura do Planalto Ocidental Paulista, caracterizada por relevo de colinas largas e suaves, com topos arredondados e inclinações variando entre 10% e 20%.

A análise hipsométrica do município de Ourinhos evidencia um relevo com altitudes que variam de aproximadamente 380 metros, nas áreas mais baixas e próximas de drenagens, até cerca de 544 metros, nas porções mais elevadas. O mapa da figura 1 mostra a distribuição das cotas altimétricas em gradientes de cores que vão do azul/esverdeado, indicando as áreas mais baixas, ao amarelo/alaranjado, representando as cotas mais elevadas.

Assim, pode-se perceber que as zonas de menor altitude concentram-se em geral na região sul e sudoeste do município, coincidente com a proximidade do rio Paranapanema e áreas de várzea, enquanto as altitudes maiores distribuem-se principalmente a nordeste e em pontos específicos onde há relevo mais ondulado.

Observando-se a mancha verde predominante na porção central do município, nota-se uma topografia mais suavemente ondulada, o que sugere relevos de transição entre as áreas de baixa altitude próximas ao rio e os pontos mais altos ao norte e leste. Esse padrão indica a presença de colinas e vales que compõem o típico relevo de *cuestas* e áreas de sedimentação nas bacias hidrográficas regionais. As diferentes tonalidades no mapa ainda permitem identificar pequenos patamares e topos mais elevados, possivelmente correspondentes a estruturas geológicas resistentes à erosão ou a divisores de água.

No extremo norte e nordeste de Ourinhos, onde aparecem as cores próximas ao laranja ou marrom, encontram-se as altitudes mais elevadas, por volta de 500 a 544 metros. Essa porção do município apresenta declividades mais intensas em comparação às planícies marginais dos rios, favorecendo a existência de vertentes mais acentuadas e potencialmente atividades agropecuárias diferenciadas em relação às áreas mais baixas. Em síntese, a hipsometria de Ourinhos reflete a transição entre a planície do rio Paranapanema e o relevo interiorano de São Paulo, conferindo ao município um mosaico de altitudes moderadas.

3. Metodologia

3.1 Procedimentos técnicos para obtenção e tratamento dos dados estimados

No presente estudo, foram utilizados os dados de precipitação do Departamento de Água e Energia do Estado de São Paulo (DAEE-SP) por meio do portal hidrológico disponibilizado pelo site: <https://hidrologia.spaguas.sp.gov.br/>. Os dados estimados por satélite foram provenientes do conjunto Nasa/Power (*Prediction Of Worldwide Energy Resources*), a escala utilizada para análise foi a diária com resolução de 1° latitude por 1° longitude. Dessa forma, o mesmo recorte temporal selecionado para os dados observados foi apropriado para o recorte temporal dos dados estimados.

3.2 Métricas estatísticas

A validação foi realizada utilizando os seguintes testes estatísticos contínuos: Coeficiente de determinação (R^2), Erro Médio (ME) e Erro Quadrático Médio (RMSE). O coeficiente de determinação (R^2) quantifica a proporção da variabilidade dos dados observados que é explicada pelas estimativas, apresentando valores entre 0 e 1; quanto mais próximo de 1, maior a capacidade preditiva do modelo. A equação que satisfaz essa relação pode ser visualizada abaixo:

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O_a)(P_i - P_a)}{[\sum_{i=1}^n (O_i - O_a)^2]^{0.5} [\sum_{i=1}^n (P_i - P_a)^2]^{0.5}} \right]^2 \quad (1)$$

onde O_i , O_a e P_i representam os valores medidos, valores médios medidos e valores de satélite, respectivamente. Além disso, n é o número de variáveis de medição que podem ser usadas para análise (TAYYEH, 2023; TAN et al., 2023). Já o Erro Médio (ME) calcula a média aritmética das diferenças entre os valores observados e estimados, permitindo identificar a presença de viés, isto é, se o modelo tende a sistematicamente superestimar ou subestimar os dados reais (LEGATES, 1999; RODRIGUES; BRAGA, 2021; CORREIA, 2024), satisfazendo a seguinte equação:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n R_i - O_i}{n} \quad (2)$$

O Erro Quadrático Médio (RMSE) eleva ao quadrado as discrepâncias individuais, realiza a soma desses valores e, em seguida, extrai a raiz quadrada do resultado, o que torna essa métrica especialmente sensível a erros de maior magnitude, fornecendo uma medida robusta da precisão do modelo (ABOELKHAIR; MORSY; EL AFANDI, 2019; ROSA, 2023). A equação é dada abaixo:

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3)$$

onde y_i representa o valor observado, $\hat{y}_i$, o valor estimado pelo modelo, e n o número total de observações. Todos os dados foram, inicialmente, organizados e tabulados em planilhas do Microsoft Excel para as posteriores análises e produtos gráficos representados na seção de resultados e discussões.

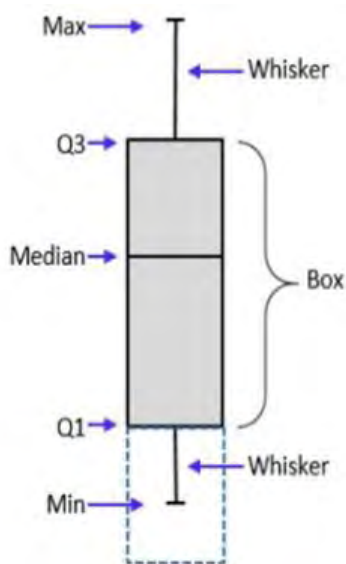
Além das métricas estatísticas, foi empregada a técnica do Box Plot para analisar a distribuição mensal dos erros entre os dados observados e estimados. O Box Plot é uma ferramenta de análise exploratória de dados que permite sintetizar a distribuição de uma série por meio de parâmetros estatísticos como valores mínimo e máximo, mediana, primeiro quartil (Q1) e terceiro quartil (Q3), além da identificação de valores extremos ou atípicos (*outliers*). Essa técnica facilita a interpretação da variabilidade dos dados e a identificação de padrões ou dispersões na série analisada (SCHNEIDER, 2014).

Assim, os dados são organizados em quatro intervalos de frequência, nos quais aproximadamente 25% dos valores se situam entre o mínimo e o primeiro quartil, 25% entre o primeiro quartil e a mediana, 25% entre a mediana e o terceiro quartil e os demais 25% acima do terceiro quartil, podendo ocorrer ainda valores extremos fora desse intervalo (EMILIANO et al., 2024).

As definições procedimentais das estatísticas descritivas por essa técnica são dadas por valores mínimos e máximos, mediana, quartis e outliers

e whiskers (figura 2), de modo que, na parte inferior, concentram-se 5% dos dados; na base superior, por sua vez, 95% dos dados e os *outliers* se estendem até o limiar definido e representam os eventos extremos na série.

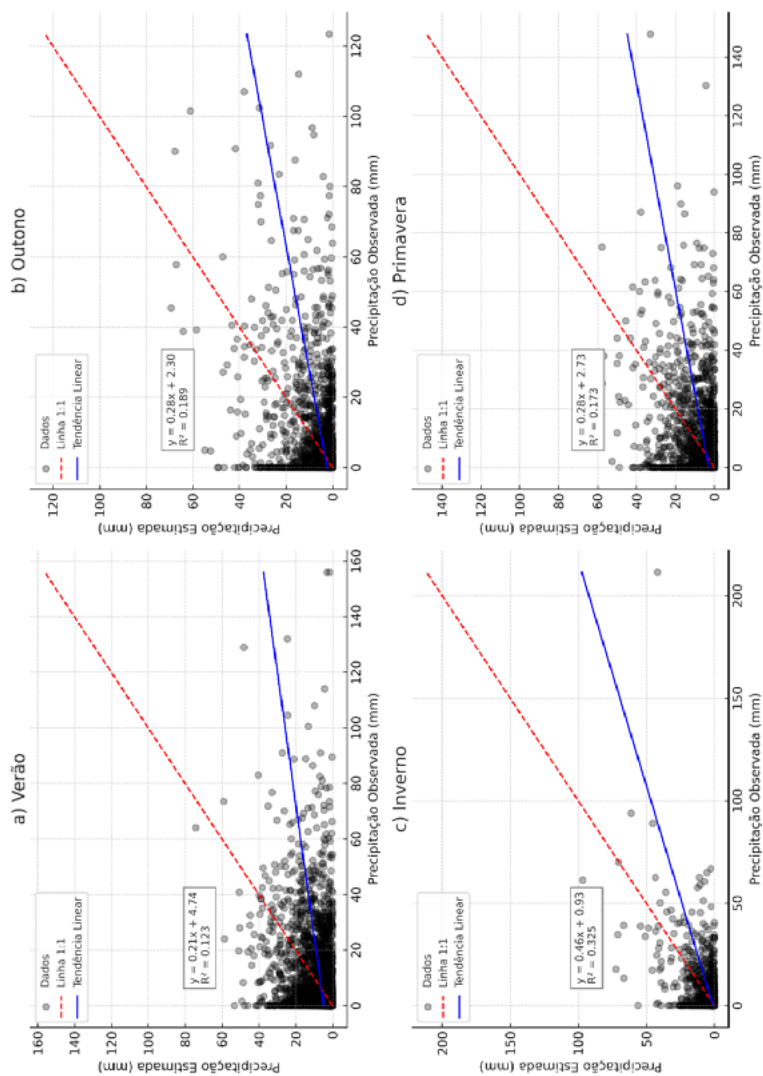
Figura 2
ELEMENTOS DO GRÁFICO BOX-PLOT



4. Resultados e discussão

Em uma primeira análise, o gráfico presente na figura 3 representa a comparação dos valores de precipitação observada pela estação pluviométrica e estimada pelo satélite de forma sazonal. No verão, verificou-se uma fraca correlação entre os valores ($R^2 = 0.123$), denotando que o modelo estimado teve um comportamento de subestimação dos dados, explicado também pela reta de tendência. No outono, observou-se que o modelo estimado alcançou uma melhora leve no coeficiente de correlação ($R^2 = 0.189$), demonstrando que a tendência também teve um crescimento leve, mesmo que ainda sejam considerados insuficientes em comparação aos dados reais, assim como no período anterior de verão.

Figura 3
ASPECTOS COMPARATIVOS ENTRE A PRECIPITAÇÃO OBSERVADA E ESTIMADA PELO NASA/POWER POR ESTAÇÕES DO ANO



Fonte: Org. dos autores (2025).

Segundo Sant'anna Neto (2000), essa questão pode ser explicada pela alta variabilidade das chuvas nessas estações para a localidade em análise, sobretudo, no verão, quando as precipitações costumam ser do tipo convectivas, dessa forma, a eficiência e precisão do modelo estimado encontra relativas dificuldades e acabam por subestimar esses picos de chuva de curta duração e forte intensidade.

Outrossim, o estudo de Serrão et al. (2016) identificou uma tendência clara de subestimação das chuvas no verão por parte do GPM (*Global Precipitation Measurement*) em relação às observações do INMET, enquanto no inverno houve superestimação. Os autores atribuem isso, em parte, à dificuldade dos sensores em capturar eventos convectivos intensos, comuns no verão amazônico. Ao considerar o desempenho interdecadal do modelo, verificou-se que as métricas estatísticas adotadas (quadro 1) tiveram um comportamento distinto ao longo do tempo.

Dessa forma, na década de 1980, o R^2 foi muito baixo (0,04), indicando quase nenhuma correlação entre os valores estimados e observados. Contudo, há uma tendência de melhora entre as décadas, chegando a 0,31 na década de 2020, embora ainda baixa. Em relação ao Erro Médio (ME), na década de 1980, o modelo apresentava uma leve superestimativa (0,17). A partir da década de 1990, o padrão se inverte e o modelo passa a subestimar sistematicamente a precipitação, com valores negativos cada vez maiores (até -0,68 na década de 2010). Isso indica uma tendência crescente de viés negativo, ainda que haja uma leve correção na década de 2020 (-0,56), possivelmente refletindo correções no modelo.

Quadro 01
ESTATÍSTICAS DA PRECIPITAÇÃO ESTIMADA POR DÉCADA (1980 A 2020)

Década	R^2	Erro Médio (ME)	Erro Quadrático Médio (RMSE)
1980	0.04	0.17	9.71
1990	0.13	-0.42	11.24
2000	0.05	-0.11	10.60
2010	0.22	-0.68	10.90
2020	0.31	-0.56	8.71

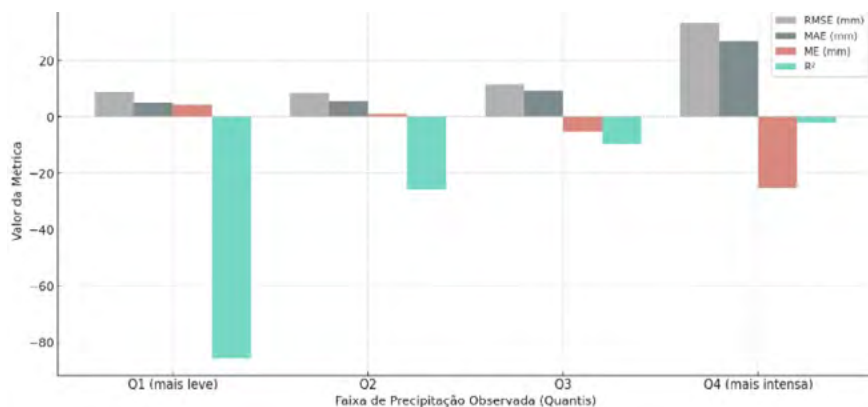
Fonte: Org. dos autores (2025).

Na análise da magnitude média dos erros (RMSE), o erro foi mais alto nas décadas de 1990 (11,24) e 2000 (10,60), indicando maior dispersão. Todavia, na década de 2020, o RMSE atinge seu menor valor (8,71), sugerindo que, mesmo com subestimações, os erros estão mais concentrados e menores em magnitude. Nesse quesito, o artigo de Rasera et al. (2023) propõe estratégias para a melhoria contínua desse banco de dados, assim, o incremento de fontes de dados mais localizados de precipitação pode reduzir os erros no modelo. Além disso, a validação cruzada com outras variáveis climáticas.

Posteriormente, avaliando o desempenho dividido entre quartis da precipitação observada, desde os eventos menos intensos (Q1) ao mais fortes (Q4), percebeu-se que no primeiro quartil (Q1), correspondente aos eventos mais fracos de precipitação, o modelo comportou-se de forma negativa, evidenciada por um R^2 negativo e muito baixo (próximo de -80), indicando que o modelo praticamente falha em explicar qualquer variabilidade dos dados observados nessa faixa. Assim, à medida que a intensidade da chuva aumenta nos quartis Q2 e Q3, há uma leve melhoria nos valores de R^2 , embora este continue negativo, o que ainda indica fraca explicação da variabilidade.

Figura 4

COMPORTAMENTO DO MODELO ESTIMADO POR INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO



Fonte: Org. dos autores (2025).

À medida que a intensidade da chuva aumenta nos quartis Q2 e Q3, há uma leve melhoria nos valores de R^2 , embora este continue negativo,

o que ainda indica fraca explicação da variabilidade. O erro médio (ME) se mantém negativo em Q2 e Q3, apontando uma persistente tendência de subestimar os valores observados. Os valores de MAE e RMSE aumentam ligeiramente, o que pode estar relacionado ao crescimento dos volumes de chuva nessa faixa.

No quartil mais alto (Q4), que representa os eventos de precipitação mais intensos, o modelo apresenta seus maiores valores de RMSE e MAE, indicando que os erros aumentam significativamente com o volume de chuva. Com isso, o erro médio (ME) é fortemente negativo, reforçando a tendência de subestimação severa nos eventos extremos. O R^2 , ainda que próximo de zero, mostra que o modelo quase não consegue representar a variabilidade desses eventos. Esse comportamento evidencia a limitação do modelo em lidar com chuvas intensas, sendo um ponto crítico para possíveis ajustes ou complementações com outras fontes de dados.

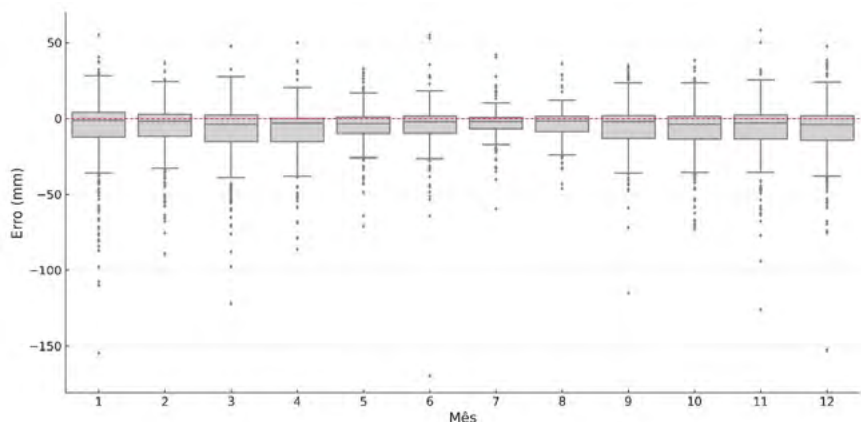
De acordo com Lavers et al. (2022), limitações parecidas podem ser encontradas na estimativa diária de precipitação global em eventos mais intensos. O estudo mostra que o ERA5, por exemplo, subestima os máximos diários anuais de precipitação (RX1), com média global observada de 66,0 mm/dia contra apenas 43,6 mm/dia no ERA5, uma diferença substancial, refletindo um viés semelhante ao ME negativo encontrado no presente estudo para a faixa de intensidade Q4.

Serra et al. (2023) também encontraram resultados que apontam para o desempenho das reanálises ERA5 e MERRA-2 durante a campanha PISTON no Pacífico equatorial ocidental. Dessa maneira, os achados dos autores evidenciaram grandes dificuldades em representar a estrutura vertical e a profundidade das nuvens associadas a sistemas convectivos intensos (MCSs), que são os principais responsáveis pelas chuvas mais volumosas para a área de estudo.

Recentemente, Sarli et al. (2025) generalizaram ao afirmar que, atualmente, nenhum produto atinge desempenho excelente. Por exemplo, ERA5 apresentou um RMSE de 3,70 mm e MERRA-2, de 3,64 mm, números relativamente baixos, contudo, acompanhados de índices POD (probabilidade de detecção) de apenas 77% e 88%, respectivamente, e valores de FAR (falsos alarmes) ainda significativos. Ademais, produtos como PERSIANN-CDR, por outro lado, apresentaram desempenho fraco, com POD de 47%.

Figura 5

BOX-PLOT DA DISTRIBUIÇÃO MENSAL DOS ERROS DE PRECIPITAÇÃO ESTIMADA X OBSERVADA



Fonte: Org. dos autores (2025).

Na distribuição dos erros mensais (figura 5), pode-se observar que, no geral, a mediana dos erros se encontra abaixo da linha zero, indicando uma subestimação sistemática das precipitações observadas por parte do modelo. Essa subestimação é mais acentuada nos meses de janeiro a março. Nos demais meses, embora a subestimação continue presente, ela ocorre de forma menos intensa, com as medianas se aproximando da linha zero. A dispersão dos erros é relativamente constante ao longo do ano, mas nota-se que os meses mais chuvosos (como janeiro, fevereiro, novembro e dezembro) apresentam maior número de *outliers* negativos, ou seja, casos em que o modelo subestimou fortemente a precipitação observada.

5. Considerações finais

Tomando por base os resultados levantados por essa pesquisa, ficou evidente que os dados de estimativa de precipitação NASA/POWER para o município de Ourinhos apresentam limitações consideráveis considerando a escala de análise diária que foi adotada. Sendo assim, a sazonalidade demonstrou que no verão e no outono, por exemplo, o modelo apresentou valores fracos em coeficiente de determinação (R^2), refletindo na baixa correlação, também, com os dados das estações pluviométricas.

A subestimação sistemática, observada nas retas de tendência, reforça que o modelo tem dificuldade em capturar os eventos mais intensos e concentrados, típicos dessas estações.

A análise interdecadal revelou uma leve tendência de aprimoramento ao longo do tempo. Ainda que os valores de R^2 permaneçam baixos, observa-se um crescimento progressivo desde a década de 1980 até os anos 2020. O erro médio (ME), por sua vez, mostrou uma inversão de sinal, com uma leve superestimativa no início da série histórica e uma subestimação crescente a partir dos anos 1990. Tal comportamento pode ser atribuído à evolução dos métodos de reanálise e ao refinamento dos modelos satelitais, embora ainda insuficientes para lidar com a complexidade dos regimes pluviométricos tropicais, especialmente em locais com elevada variabilidade espacial e temporal.

Nos resultados referentes à avaliação por intensidade de precipitação, dividida em quartis, houve evidências de uma característica particular: quanto mais intensa a precipitação, maior a magnitude dos erros e menor a capacidade explicativa do modelo. No quartil superior (Q4), referente aos eventos extremos, os valores de RMSE e MAE são os mais elevados, enquanto o R^2 se aproxima de zero. Esse padrão confirma que o modelo falha especialmente nos momentos em que a acurácia é mais necessária, durante os extremos hidrometeorológicos, que têm implicações diretas em segurança, planejamento e gestão de recursos.

Além disso, ao observar a distribuição mensal dos erros, verifica-se que a subestimação é sistemática ao longo de todo o ano, com destaque para os meses mais chuvosos, como janeiro, fevereiro e março, nos quais as medianas dos erros são mais distantes da linha de acerto e a presença de *outliers* negativos é maior. Isso reforça a tese de que o modelo não consegue captar com precisão os volumes elevados de precipitação, mesmo em períodos em que esses eventos são esperados. A relativa constância da dispersão indica que o erro é persistente, e não um fenômeno isolado.

Comparando com a literatura, os resultados obtidos dialogam com estudos recentes que apontam limitações similares em produtos globais como ERA5, MERRA-2 e GPM, sobretudo em regiões tropicais e durante eventos convectivos intensos. A dificuldade em representar adequadamente a estrutura vertical das nuvens e o ciclo diurno da convecção são

apontados como causas técnicas centrais dessas deficiências. Ainda que alguns produtos demonstrem melhor desempenho em escalas mensais ou anuais, os resultados em escala diária, como observado neste trabalho, ainda deixam margem para melhorias significativas.

Portanto, as evidências reunidas apontam para a necessidade de melhorias no processo de estimativa da precipitação por modelos como o NASA/POWER. Estratégias recomendadas incluem o uso de calibração regional com dados de estações locais, a integração com produtos híbridos de maior resolução e a aplicação de métodos de validação cruzada com outras variáveis climáticas.

Para usos operacionais e de pesquisa, recomenda-se cautela na aplicação direta desses dados em estudos que demandem alta precisão, especialmente em regiões de alta intensidade pluviométrica ou eventos extremos. A continuidade desses diagnósticos é essencial para garantir maior confiabilidade nos produtos utilizados em estudos ambientais, agrícolas e de planejamento territorial.

Referências

ABOELKHAIR, Hassan; MORSY, Mostafa; EL AFANDI, Gamal. Assessment of agroclimatology NASA POWER reanalysis datasets for temperature types and relative humidity at 2 m against ground observations over Egypt. **Advances in Space Research**, v. 64, n. 1, p. 129-142, 2019.

BIER, Anderson Augusto; FERRAZ, Simone Erotildes Teleginski. Comparação de metodologias de preenchimento de falhas em dados meteorológicos para estações no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 215-226, 2017.

BOIN, Marcos Norberto. **Chuvas e Erosões no Oeste Paulista**: uma análise climatológica aplicada. 2000. 264f. il. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - IGCE/UNESP, Rio Claro, 2000.

BOIN, Marcos Norberto; ZAVATTINI, João Afonso. Variações do Ritmo Pluvial no Oeste Paulista: gênese e impactos erosivos. **Geografia**, v. 30, n. 1, p. 115-139, 2005.

BRUBACHER, João Paulo; OLIVEIRA, Guilherme Garcia de; GUASSELLI, Laurindo Antonio. Preenchimento de falhas e espacialização de dados pluviométricos:

desafios e perspectivas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 4, p. 615-629, 2020.

CHRISTOFOLETTI, A. L. H. Procedimentos de análise utilizados no estudo da precipitação. **Geociências**, v. 11, n. 1, p. 75-98, 1992.

CORREIA, André Anjos. Desempenho do projeto POWER/NASA para estimativa de precipitação pluvial e temperatura do ar no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, v. 5, n. 3, p. 46-60, 2024.

COSTA, Julio et al. Validação dos dados de precipitação estimados pelo CHIRPS para o Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, p. 228-243, 2019.

DUARTE, Yury; SENTELHAS, Paulo C. NASA/POWER and DailyGridded weather datasets - how good they are for estimating maize yields in Brazil? **International Journal of Biometeorology**, v. 64, p. 319-329, 2020.

EMILIANO, Valéria Machado et al. Variabilidade pluviométrica na área paulista da bacia hidrográfica do rio Ribeira de Iguape (Brasil) e a influência do ENOS, a partir da técnica Box-Plot. **Terr@ Plural**, v. 18, p. 1-21, 2024.

FONTÃO, Pedro Augusto Breda. A escola brasileira de climatologia geográfica: perspectivas atuais e futuras do paradigma do ritmo climático. In: GUIMARÃES, Alessandra Rodrigues; FONSECA, Rogério Gerolineto; FERNANDES, Sibeli (Org.). **Perspectivas Geográficas**. Ituiutaba-MG: Barlavento, 2021. p. 10-28.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico 2022**: resultados preliminares. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapa geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: IPT, 1981.

JOHNSON, Gregory L.; HANSON, Clayton L. Topographic and atmospheric influences on precipitation variability over a mountainous watershed. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 34, n. 1, p. 68-87, 1995.

LAVERS, David A. et al. An evaluation of ERA5 precipitation for climate monitoring. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 148, n. 748, p. 3152-3165, 2022.

LEGATES, David R.; MCCABE JR, Gregory J. Evaluating the use of “goodness of fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water resources research**, v. 35, n. 1, p. 233-241, 1999.

LÓPEZ-BERMEJO, Carlos et al. Validation of the accuracy of the CHIRPS precipitation dataset at representing climate variability in a tropical mountainous

region of South America. **Physics and Chemistry of the Earth**, Parts A/B/C, v. 127, p. 103184, 2022.

MARTINS, Letícia Lopes et al. Gap-filling of daily precipitation and streamflow time series: a method comparison at random and sequential gaps. **Hydrological Sciences Journal**, v. 68, n. 1, p. 148-160, 2023.

MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo. **O Clima e a organização do espaço no estado de São Paulo**. São Paulo: Instituto de Geografia, 1962.

MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo. **Clima urbano**. São Paulo: Edusp, 1971.

MONTEIRO, Leonardo A.; SENTELHAS, Paulo C.; PEDRA, George U. Assessment of NASA/POWER satellite based weather system for Brazilian conditions and its impact on sugarcane yield simulation. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 3, p. 1571-1581, 2018.

MORENO-MARTÍNEZ, Álvaro et al. A methodology to derive global maps of leaf traits using remote sensing and climate data. **Remote sensing of environment**, v. 218, p. 69-88, 2018.

PERUSI, Maria Cristina; DEMARCHI, Júlio César; PIROLI, Edson Luís; FERREIRA, Jackson José; DOS SANTOS GALVANIN, Ednéia Aparecida; DA SILVA FUZZO, Daniela Fernanda. Determinação do potencial natural de erosão (pne) e degradação do solo associada a rodovias no município de Ourinhos/SP. **Formação (Online)**, [S. l.], v. 29, n. 54, p. 357-386, 2022.

RASERA, Júlia Boscaroli et al. Do Gridded Weather Datasets Provide High-Quality Data for Agroclimatic Research in Citrus Production in Brazil? **AgriEngineering**, v. 5, n. 2, p. 924-940, 2023.

RODRIGUES, Gonçalo C.; BRAGA, Ricardo P. Evaluation of NASA POWER reanalysis products to estimate daily weather variables in a hot summer mediterranean climate. **Agronomy**, v. 11, n. 6, p. 1207, 2021.

ROSA, Stefanie Laís Kreutz; SOUZA, Jorge Luiz Moretti de; SANTOS, Aline Aparecida dos. Data from NASA Power and surface weather stations under different climates on reference evapotranspiration estimation. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 58, p. e03261, 2023.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches; MOROZ, Isabel Cristina. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: USP-FFLCH/IPT/FAPESP, 1997. v. 1. 1 mapa. Escala: 1:500.000.

SANT'ANNA NETO, João Lima. As chuvas no Estado de São Paulo: A variabilidade pluvial nos últimos 100 anos. In: SANT'ANNA NETO, João Lima; ZAVATTINI,

João Afonso. **Variabilidade e Mudanças Climáticas**: Implicações Ambientais e Socioeconômicas. Maringá: Eduem, 2000. Parte. II, p. 95-119.

SARLI, Reza et al. Evaluating the accuracy of the global precipitation products: a time-series analysis in Poland. **Climate Dynamics**, v. 63, n. 3, p. 1-19, 2025.

SCHNEIDER, Heverton; DA SILVA, Charlei Aparecido. O uso do modelo box plot na identificação de anos-padrão secos, chuvosos e habituais na microrregião de Dourados, Mato Grosso do Sul. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 27, p. 131-146, 2014.

SERRA, Yolande L. et al. Rainfall and Convection in ERA5 and MERRA-2 over the Northern Equatorial Western Pacific during PISTON. **Journal of Climate**, v. 36, n. 3, p. 845-863, 2023.

SERRÃO, Edvaldo Afonso de Oliveira et al. Avaliação estatística entre as estimativas de precipitação da constelação GPM com TRMM: uma análise a bacia hidrográfica do rio Solimões. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, p. 256-275, 2016.

SHETTY, Swathi; UMESH, Pruthviraj; SHETTY, Amba. Dependability of rainfall to topography and micro-climate: an observation using geographically weighted regression. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 147, n. 1, p. 217-237, 2022.

TAN, Mou Leong et al. Evaluation of NASA POWER and ERA5-Land for estimating tropical precipitation and temperature extremes. **Journal of Hydrology**, v. 624, p. 129940, 2023.

TAVARES, Camila de Moraes Gomes et al. Filling gaps of daily precipitation data at rain gauges in a tropical mountainous region: a case study of the municipality of petrópolis, rj, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 156, n. 3, p. 1-14, 2025.

TAYYEH, Halah Kadhim; MOHAMMED, Ruqayah. Analysis of NASA POWER reanalysis products to predict temperature and precipitation in Euphrates River basin. **Journal of Hydrology**, v. 619, p. 129327, 2023.

TÓRNIO, Carlos Augusto Abreu; KEDE, Maria Luiza Félix Marques; DE SOUZA, Lucio Silva. Avaliação do desempenho das estimativas de precipitação do produto CHIRPS para os municípios de São Gonçalo e Niterói (RJ). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 34, p. 79-103, 2024.

ULIANA, Eduardo Morgan et al. Validação e análise espaço-temporal de dados de precipitação obtidos por sensoriamento remoto CHIRPS para o estado de Mato Grosso, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 35, p. 630-654, 2024.

VAREJÃO-SILVA, Mário Adelmo. **Metereologia e Climatologia**. Recife, 2006. Versão digital 2.

ZAVATTINI, João Afonso. **Climatologia**: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

Recebido em 12/09/2025

Aceito em 03/05/2026