

VALIDAÇÃO DE ESTIMATIVAS DE PRECIPITAÇÃO PLUVIAL NA AMAZÔNIA LEGAL BRASILEIRA VIA PRODUTOS ORBITAIS

Paulo Miguel de Bodas Terassi¹

Jakeline Baratto²

Givanildo de Gois³

Thiago Alves de Oliveira⁴

RESUMO

O objetivo desta pesquisa consistiu em validar as estimativas de precipitação pluvial via produtos satelitais para a Amazônia Legal brasileira (ALB). Para tanto, foram utilizados os dados anuais das estações meteorológicas administradas pelo Instituto Nacional de Meteorologia, com séries temporais de 1983 a 2019. Para a análise via produtos orbitais, foram manipulados os dados oriundos do CHELSA, CHIRPS, MERRA, PERSIANN-CDR e PERSIANN-CCS/CDR, avaliando o grau de aderência dos dados de produtos orbitais e os dados observacionais a partir das seguintes métricas: erro relativo (Pbias); raiz do erro médio quadrado (RMSE); e índice de concordância de Willmott (d). Os resultados mostraram que o CHIRPS é o produto orbital de maior exatidão com superestimativas em 2,4%, enquanto o PERSIANN-CCS/CDR é o produto satelital mais desaconselhado a ser utilizado na ALB, dado sua pior performance nos testes de aderência e seu elevado nível erro em função das suas superestimativas (Pbias = 14,9%).

Palavras-chave: produtos satelitais; dados observacionais; Amazônia Legal Brasileira; estimativas de precipitação; métricas de performance.

ABSTRACT

This research aimed to validate the rainfall estimates derived from satellite products to the Brazilian Legal Amazon (BLA). For this purpose, was used the annual rainfall data of the weather stations managed by the National Institute of Meteorology, with time series between 1983 to 2019. For the analysis via orbital products, data from CHELSA, CHIRPS, MERRA, PERSIANN-CDR, and PERSIANN-CCS/CDR were manipulated, evaluating the degree of adherence of orbital product data and observational data from the following metrics: relative error (Pbias); root mean square error (RMSE); and Willmott concordance index (d). The results showed that CHIRPS is the most accurate orbital product with overestimates in 2.4%, while PERSIANN-CCS/CDR is the least recommend being used in ALB, given its worst performance in adhesion tests and its high-level error as a function of its overestimates (Pbias = 14.9%).

¹ Pesquisador de Pós-Doutorado do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo (USP) - SP, pmbterassi@gmail.com;

² Pesquisadora de Pós-Doutorado do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo (USP) - SP, jakelinebarattogeo@gmail.com;

³ Pesquisador de Pós-Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal do Acre (UFAC) - AC, givanildogois@gmail.com;

⁴ Discente do curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Geografia Física da Universidade de São Paulo (USP) - SP thiago.a.oliveira@usp.br.

Keywords: satellite products; observation data; Brazilian Legal Amazon; rainfall estimates; performance metrics.

INTRODUÇÃO

A precipitação pluvial corresponde ao fator de maior influência nas regiões de clima tropical, posto que, habitualmente, a água nestas áreas é um componente superavitário. Em específico, a ocorrência deste fenômeno atmosférico é um dos aspectos fundamentais para a existência de uma elevada biodiversidade em biomas como a Amazônia. Selecionada para esta pesquisa e extrapolando os limites naturais, a Amazônia Legal brasileira (ALB), criada em 1953 pela Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia (SUDAM), abrange uma área de aproximadamente 5,0 milhões de km² (IBGE, 2022).

Diversos ecossistemas da Amazônia são altamente vulneráveis às modificações do clima e os sinais atualmente verificados já são preocupantes. De acordo com Alves de Oliveira et al. (2021), o desmatamento em grande escala da floresta associado às mudanças climáticas acelera o processo de savanização desse bioma, repercutindo também no risco extremo de estresse térmico.

Ressalta-se que a Amazônia Legal possui 772 municípios e uma população estimada em 23,5 milhões de habitantes (IBGE, 2022) e, portanto, o conhecimento das características climáticas neste recorte espacial é altamente relevante, uma vez que se trata do bioma com a maior biodiversidade mundial (Salati; Vose, 1984; Varela, 1997). Sobretudo, destaca-se que o equilíbrio ambiental desta região é considerado essencial para a manutenção da geração das chuvas em outros setores do Brasil, principalmente no Centro-Sul (Marengo, 2005; Marengo et al., 2018), onde há a concentração da população brasileira e, destacadamente, grande parte do setor agrícola e a produção de alimentos do território nacional.

Neste contexto, o conhecimento da variabilidade pluvial permite identificar padrões que subsidiam o planejamento e a gestão territorial, com vistas a avaliar os impactos decorrentes das atividades antrópicas e as mudanças ambientais. As estimativas dos indicadores climáticos extremos possibilitam aferir de modo mais preciso a magnitude e intensidade de anomalias e excepcionalidades da precipitação pluviométrica. Além disso, há um subsídio ao segmento hidroenergético e às atividades agropecuárias, buscando minimizar perdas econômicas oriundas de longos períodos de estiagens e de chuvas excessivas (Mu; Jones, 2019; Xavier *et al.*, 2021).

Em função da extensa área pertencente à ALB, verifica-se uma quantidade insuficiente de estações pluviométricas que registram os dados deste atributo climático. Portanto, identifica-



se uma grande recorrência aos dados de reanálises e oriundos de produtos satelitais para uma compreensão mais detalhada da distribuição espaço-temporal da precipitação pluvial. Contudo, uma das maiores implicações em relação à utilização destes dados estimados é a sua margem de erro, posto que cada um dos produtos orbitais apresenta diferentes critérios que apresentam vantagens e limitações. Isto posto, o objetivo desta pesquisa consiste em validar as estimativas de precipitação pluvial via produtos satelitais para a ALB, sendo assim um trabalho inédito para uma área de grande extensão e com uma rarefação significativa de dados meteorológicos.

METODOLOGIA

A área selecionada para o presente estudo corresponde à Amazônia Legal, equivalente a 59% do território brasileiro e engloba oito estados: Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins e parte do estado do Maranhão. Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram utilizados os dados anuais de precipitação pluviométrica e registrados em 38 estações meteorológicas convencionais administradas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2022), com segmento temporal que se inicia em 1983 e 2019 (**Figura 1**). Optou-se pela utilização de dados com até 10% de falhas de registros.

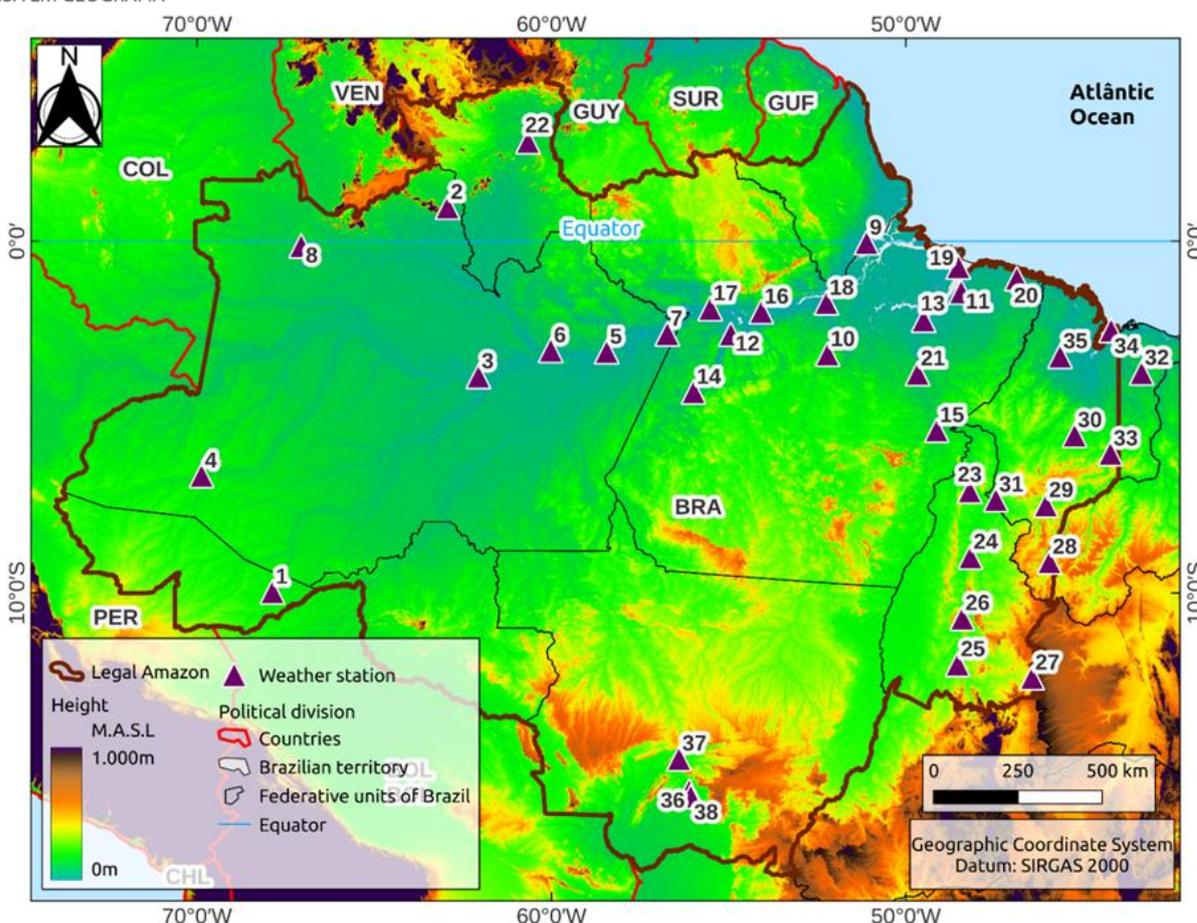


Figura 1: Localização das estações meteorológicas convencionais do INMET na ALB.

Para avaliação dos dados de precipitação pluvial na Amazônia Legal, foram utilizados os dados provenientes dos seguintes produtos: Climatologies At High Resolution For The Earth's Land Surface Areas (CHELSA); Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS); Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications Version 2 (MERRA 2); PERSIANN-CDR (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks - Climate Data Record); e, por fim, PERSIANN CCS-CDR, sendo que a sigla CCS refere-se à Cloud Classification System.

Para validação dos dados extraídos dos produtos orbitais foram calculadas métricas de performance comumente aplicadas na avaliação temporal entre dados observados e dados de produtos orbitais, são elas: erro relativo (pbias) - quanto mais próximo a zero, melhor é a acurácia entre os dados observados e os dados de produtos orbitais; Raiz do erro quadrático médio (RMSE) - quanto mais próximo a zero, melhor é a aderência dos dados estimados pelos produtos orbitais em relação aos dados observados; e índice de concordância de Willmott (d) - quanto mais próximo a um, melhor é a acurácia dos dados estimados em relação aos dados observados (Aghakouchak; Mehran, 2013; Islam, 2018; Xavier et al., 2021).



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados a seguir pelas métricas e testes estatísticos descritos indicaram quais produtos orbitais fornecem dados de precipitação pluviométrica anual (mm) para a Amazônia Legal Brasileira (ALB). O diagrama de dispersão demonstra que não há um padrão definido para o melhor produto satelital para a área de estudo, tendo uma elevada diferença entre os setores da ALB. Destaca-se que o PERSIANN-CCS/CDR obteve o menor valor do índice de concordância (d) em 18 localidades (47,4%), distribuídos uniformemente pela ALB, ao passo que o MERRA é considerado o mais desaconselhável para estimar a precipitação anual em 26,3% das estações meteorológicas utilizadas, com os piores resultados concentradas nos estados do Pará, Maranhão e Mato Grosso (**Figura 2**).

O CHELSA foi considerado o melhor produto orbital para 17 estações meteorológicas (44,7%) e o CHIRPS em outras 12 (31,6%). Majoritariamente, verificou-se que o CHELSA foi o melhor produto satelital em localidades do estado do Pará (entre ID's 12 e 17 e ID's 19 e 20), do Maranhão (ID's 29, 34 e 35), do Mato Grosso (ID's 37 e 38), Tocantins (ID'S 24 e 25), Amapá (ID 09) e, menor proporção, para o Amazonas (ID 07). Por sua vez, o CHIRPS mostrou-se mais eficiente em localidades do Tocantins (entre ID's 26 e 28) e Maranhão (ID's 30, 32, 33). O PERSIANN-CDR mostrou-se maiores valores do índice (d) em localidades do Pará (ID 18 e 21), do Tocantins (ID 23) e do Maranhão (ID 31), enquanto o MERRA indicou com maior acurácia os dados de precipitação no Amazonas (ID'02, 04 e 05) - (**Figura 2**).

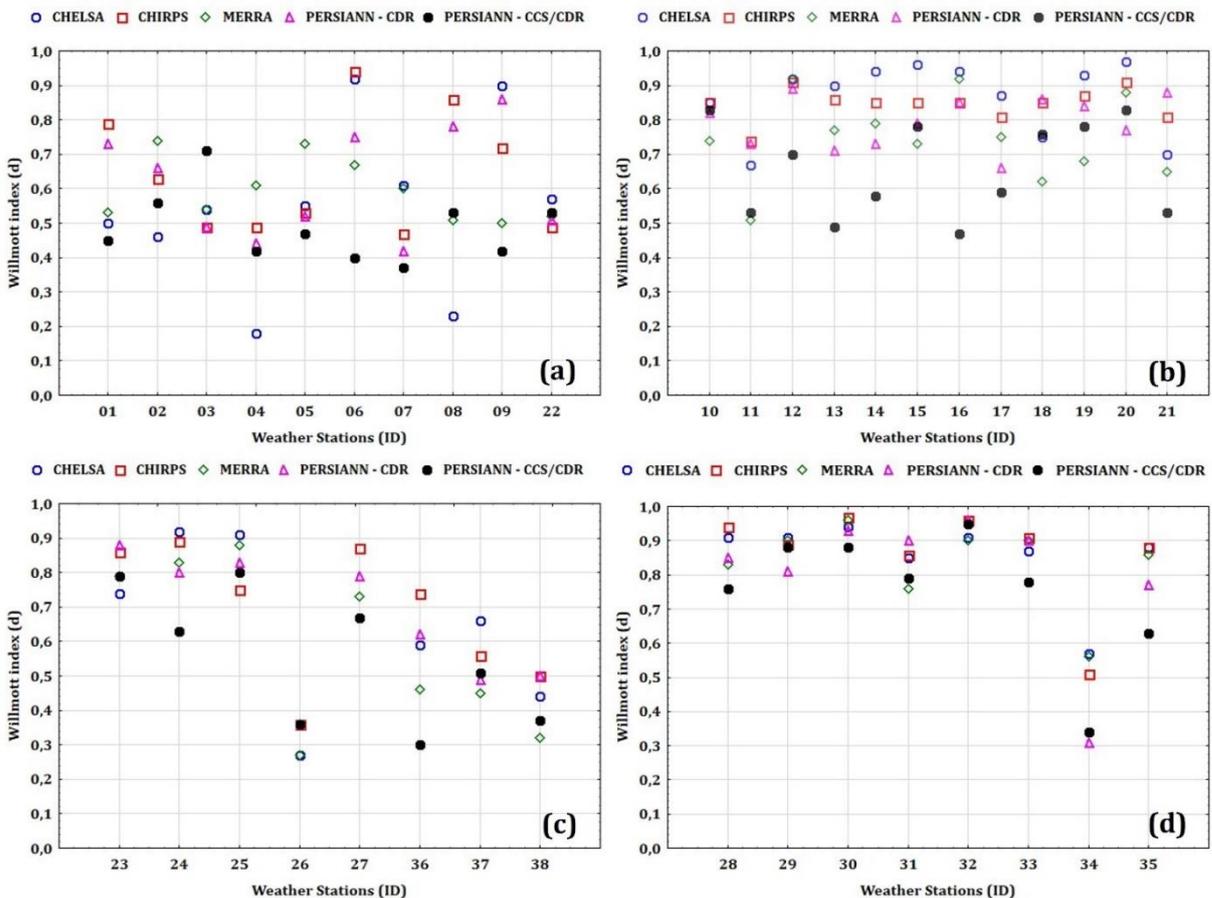


Figura 2: Diagrama de dispersão do teste de concordância (d) de Willmott para a verificação da aderência dos dados dos produtos orbitais aos dados observacionais nos estados do Amazonas (ID 01 a 08), Amapá (ID 09) e Roraima (ID 22) em (a), no estado do Pará em (b), nos estados do Tocantins (ID 23 a 27) e Mato Grosso (ID 36 a 38) em (c) e no estado do Maranhão em (d).

Um dos mais importantes parâmetros estatísticos, a RMSE (raiz do erro quadrático médio) demonstrou valores mais altos para o PERSIANN-CCS/CDR em 24 localidades (63,2%) e, deste modo, é isoladamente o produto orbital que oferece menor acurácia para estimar as chuvas anuais na ALB. Por sua vez, o MERRA obteve valores mais elevados da RMSE em 9 estações meteorológicas (23,7%), com uma ocorrência prevalecente no estado do Pará (ID's 10,11, 15, 18 e 19). O CHELSA e PERSIANN-CDR obtiveram os maiores valores de RMSE em duas localidades, enquanto o CHIRPS foi somente considerado o pior produto derivado de satélite (PDS) somente em ID 03 (**Figura 3**).

O CHELSA foi o PDS com os menores valores da RSME em 14 estações meteorológicas (38,4%), com destaque para as localidades do Pará e Tocantins, contabilizando-se sete e três localidades, respectivamente. Segundo os resultados da RSME, o CHIRPS é o melhor produto satelital em 12 localidades (31,6%), com maior frequência nos estados do Pará (ID's 10, 11 e 18) e Maranhão (ID's 28, 30 e 35). Para o PERSIANN-CDR, identificou-se os menores valores



da RMSE para 7 estações meteorológicas (18,4%), com maior regularidade no setor noroeste e extremo norte da Amazônia em (ID'02 e 22) e no estado do Maranhão (ID's 31, 32 e 33) – (Figura 3).

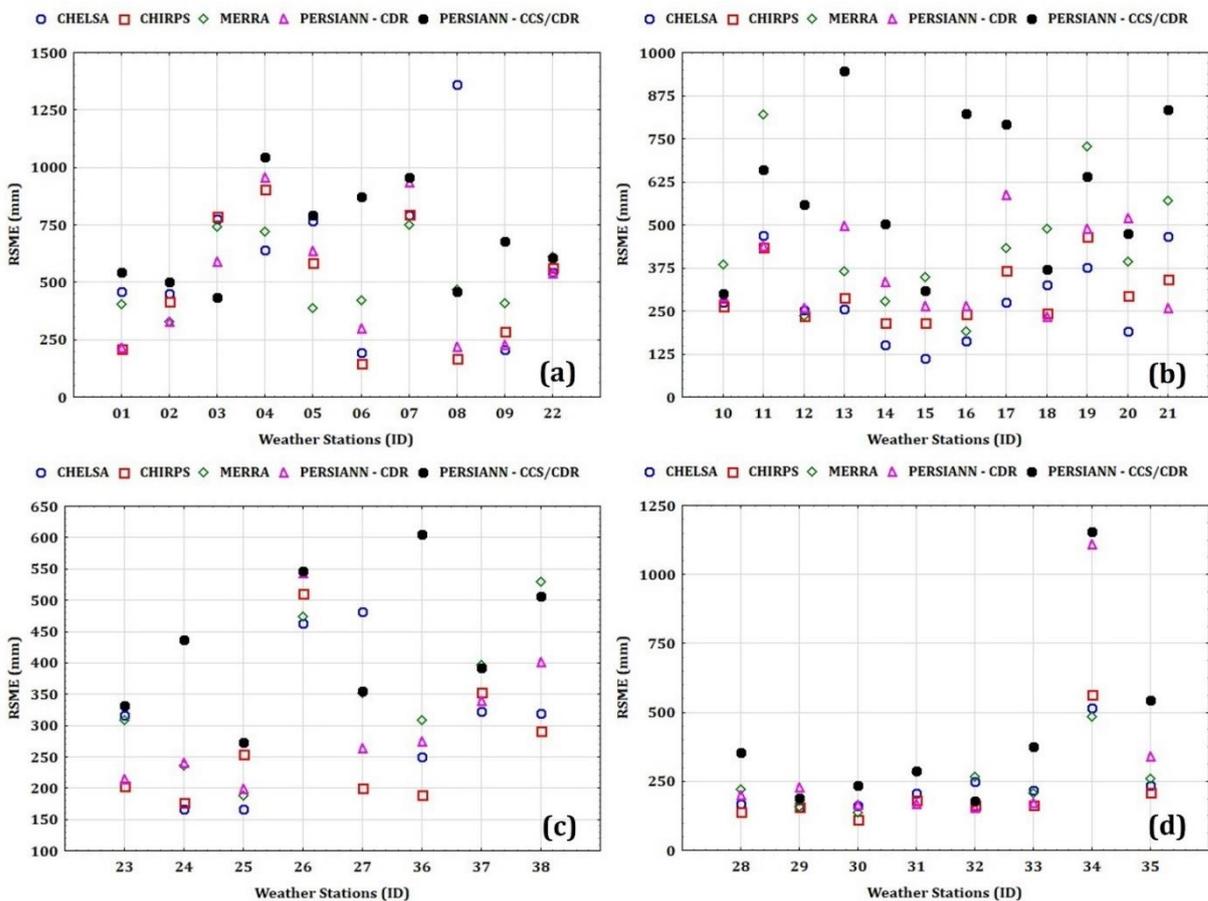


Figura 3: Diagrama de dispersão da raiz quadrada do erro médio (RSME) calculada entre os dados dos produtos orbitais aos dados observacionais nos estados do Amazonas (ID 01 a 08), Amapá (ID 09) e Roraima (ID 22) em (a), no estado do Pará em (b), nos estados do Tocantins (ID 23 a 27) e Mato Grosso (ID 36 a 38) em (c) e no estado do Maranhão em (d).

Os resultados do erro relativo ou Pbias (%) mensuram o quanto os PDS superestimam ou subestimam os dados de precipitação pluviométrica em relação aos dados observacionais. É possível destacar que o PERSIANN-CCS/CDR é o PDS que mais comumente superestima os totais pluviiais anuais, em média 14% para toda a Amazônia Legal Brasileira, superando os 20% em 10 localidades da ALB (26,3%). Ressalta-se que o produto satelital PERSIANN-CDR superestimou em média 8,9% dos totais anuais para a área em estudo, sendo aquele com o maior nível de erro (acima dos 20%) em cinco localidades. Em oposição, o produto orbital que mais subestimou os totais pluviiais foi o MERRA, com média de 4,5%, superando os 15% em seis localidades. Contudo, embora tenha subestimado somente 1,7% da pluviosidade na ALB, o CHELSA mostrou valores discrepantes sobretudo em localidades da Amazônia Ocidental, com



destaque para valores acima de 15% no estado do Amazonas (ID's 02, 03 e 08) e no Acre (ID 01). Finalmente, o CHIRPS superestimou os totais anuais de chuvas na área de estudo em 2,4%, sendo acima dos 15% em quatro localidades (ID's 04, 05, 26 e 34) - (Figura 4).

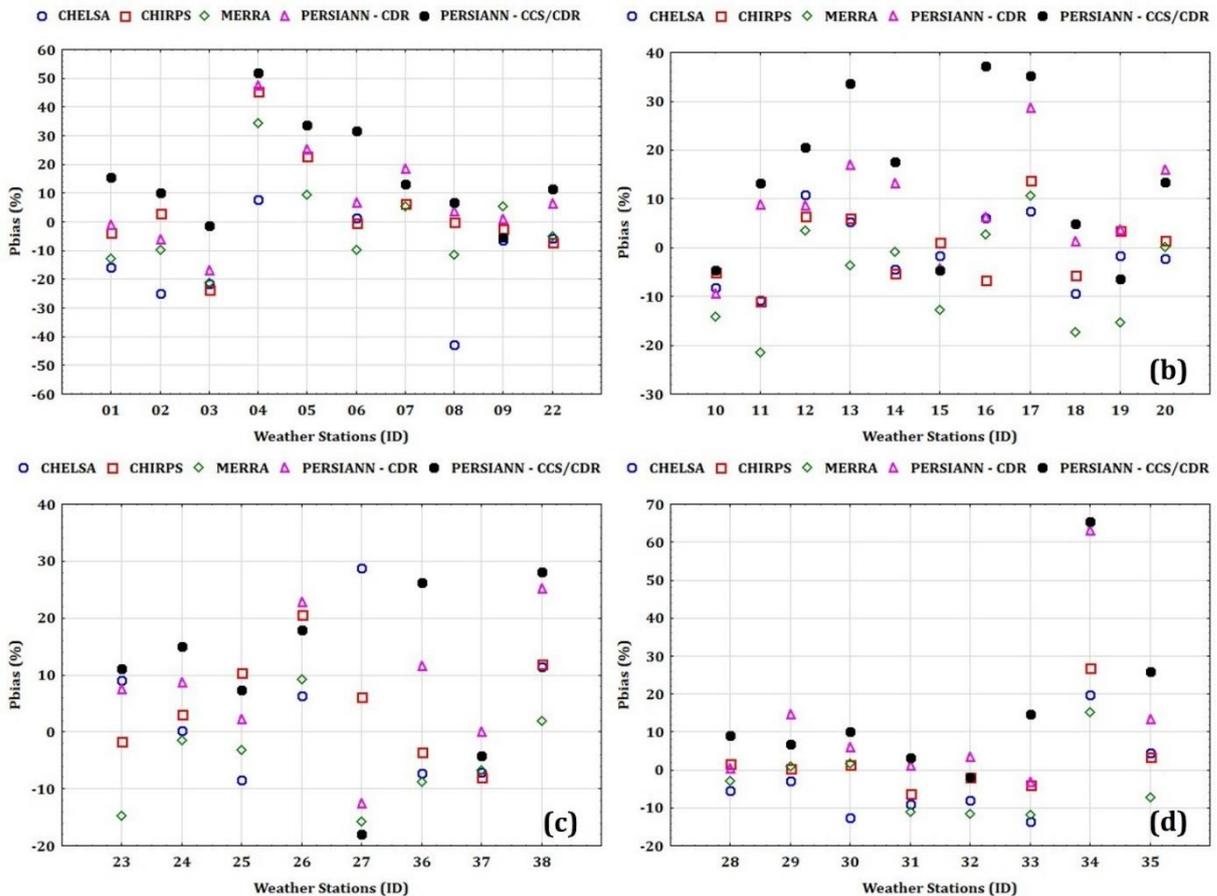


Figura 4. Diagrama de dispersão do Erro Relativo - Pbias (%) calculada entre os dados dos produtos orbitais aos dados observacionais nos estados do Amazonas (ID 01 a 08), Amapá (ID 09) e Roraima (ID 22) em (a), no estado do Pará em (b), nos estados do Tocantins (ID 23 a 27) e Mato Grosso (ID 36 a 38) em (c) e no estado do Maranhão em (d).

A partir da comparação entre os dados observacionais e os dados do CHIRPS, Costa et al. (2019) identificaram um valor médio de RMSE de 15 mm, valores que comparados aos obtidos nesta pesquisa são relativamente baixos. Cavalcante et al. (2020) ressaltaram que os dados do CHIRPS tendem a subestimar a chuva nos meses mais chuvosos na Amazônia Legal brasileira de um modo geral e que os valores mais elevados de correlação linear de Pearson foram maiores na estação chuvosa e no setor leste, o que corroborava as observações discurridas anteriormente. Para a escala anual, estes autores identificaram que as correlações foram superiores a 0,75 em 34 dentre as 45 estações meteorológicas utilizadas para a validação dos dados estimados pelo CHIRPS. Resultados semelhantes foram encontrados por Mu e Jones



(2019) e a validação da acurácia de produtos derivados do CHIRPS de 1981 a 2019 para estimar valores de precipitação em Rondônia (Amazônia brasileira) foram analisados.

Silva et al. (2020) avaliaram a precisão do CHIRPS em estimar as chuvas para a sub-bacia do rio Apéu, em Castanhal (PA) e mostraram que a relação entre os dados CHIRPS com os dados de superfícies foi mais elevada em relação à maioria dos resultados indicados nesta pesquisa, com valores de R^2 de 0,95 para os postos do INMET e 0,99 para os da ANA. Para a escala anual, observaram um Pbias de 52,2% para os postos do INMET e 13,4 para os da ANA, com um índice (d) de 0,81 e 0,97 e um RSME de 98,5 e 44,0 mm, nesta ordem. É importante ressaltar que estas métricas identificaram que há uma maior imprecisão em estimar os dados de precipitação para o período chuvoso (dezembro a maio) devido à grande atividade convectiva e a nebulosidade elevada que ocorre neste período. Barbosa et al. (2020) constatararam que o CHIRPS apresenta acurácia para estimar a precipitação pluvial na bacia hidrográfica na sub-bacia do rio Guamá por apresentar correlação notavelmente alta ($r = 0,98$) e índice de concordância satisfatória ($d = 0,96$), com Pbias entre 4 e 20% e RSME equivalente entre 14 e 43 mm.

Contudo, para a bacia hidrográfica do rio Mearim, na área de transição da Amazônia e da Caatinga no estado do Maranhão, Xavier et al. (2022) observaram que, dentre os produtos orbitais analisados, as melhores métricas foram inferidas para o CHIRPS e o PERSIAN-CDR, especialmente no período mais chuvoso, entre dezembro e maio. Estes autores ressaltam que, para os extremos diários na escala mensal, o melhor SRE foi o PERSIANN-CDR com razoável aderência para o CHIRPS. Paredes-Trejo et al. (2016) mostraram boas correlações entre os dados do CHIRPS e os dados observacionais para o Nordeste brasileiro, e encontraram valores de correlação de até 94%.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados dos testes estatísticos e métricas avaliaram o nível de precisão dos PDS's. Sendo assim, o produto orbital com o menor valor médio da RMSE foi o CHIRPS (325,8 mm), ao passo que o CHELSA também mostrou resultados satisfatórios (366,1 mm) e que validam estes produtos orbitais como, de modo geral, os melhores para estimar dados anuais de precipitação na Amazônia Legal brasileira. Em oposição, o PERSIANN-CCS/CDR foi considerado o PDS com média da RMSE para toda a ALB equivalente a 549,3 mm e, em seguida, MERRA (RMSE = 402,6 mm) e PERSIANN-CDR (RMSE = 379,2 mm) apresentaram

resultados que desaconselham sua utilização. Os valores da média do índice de concordância (d) mostraram que o CHIRPS é o produto satelital com maior acurácia ($d = 0,76$) para a Amazônia Legal, embora o CHELSA tenha mostrado resultado adequado para a validação do seu uso para fornecer dados anuais de precipitação pluviométrica ($d = 0,73$). Contrapondo-se, o PERSIANN-CCS/CDR foi considerado o pior PDS ($d = 0,61$), seguido do MERRA ($d = 0,69$) e do PERSIANN-CDR ($d = 0,72$). Portanto, a partir destes resultados, é possível recomendar o emprego dos dados estimados pelo CHIRPS e CHELSA, nesta ordem, e contraindicar a utilização do PERSIANN-CCS/CDR e MERRA neste setor do território brasileiro.

Foi identificado que o CHIRPS, embora seja o PDS com maior acurácia, superestima os totais anuais de precipitação em 2,4%, valores inferiores aos 8,9% e 14,9% identificados para o PERSIANN-CDR e PERSIANN-CCS/CDR. O MERRA é o produto satelital que mais subestima a precipitação anual na Amazônia Legal ($P_{bias} = 4,5\%$), valor elevado em comparação ao CHELSA, PDS que subestima em menor percentual ($P_{bias} = 1,7\%$). Estas métricas, portanto, permitem respaldar as afirmações anteriores de que o CHIRPS é o PDS de maior exatidão, enquanto o PERSIANN-CCS/CDR é o produto satelital mais desaconselhado a ser utilizado na ALB, dado sua pior performance nos testes de aderência e seu elevado nível erro em função das suas superestimativas.

REFERÊNCIAS

ALVES de OLIVEIRA, B.F.; BOTTINO, M.J.; NOBRE P.; NOBRE, C.A. Deforestation and climate change are projected to increase heat stress risk in the Brazilian Amazon. **Communications Earth & Environment**, v.2, Article number 207, 2021. DOI: 10.1038/s43247-021-00275-8

AGHAKOUCHAK, A.; MEHRAN, A. Extended contingency table: performance metrics for satellite observations and climate model simulations. **Water Resources Research**, v.49, n.10, p.7144–7149, 2013. DOI: 10.1002/wrcr.20498

BARBOSA, I.C.C.; SILVA, E.R.M.; SILVA, H.J.F.; COSTA, L.G.S.; VITORINO, M.I.; SOUSA, A.M.L. Precipitation evaluation based on CHIRPS and GPCP data with surface measurements in the Guamá River sub-basin in northeastern Pará, Brazil. **Ciência & Natura**, Santa Maria, v.42, e32, p.1-18, 2020. DOI: 10.5902/2179460X42094

CAVALCANTE, R.B.L.; FERREIRA, D.B.S.; PONTES, P.R.M.; TEDESCHI, R.G.; COSTA, C.P.W.; SOUZA, E.V. Evaluation of extreme rainfall indices from CHIRPS precipitation estimates over the Brazilian Amazonia. **Atmospheric Research**, v.238, p.104879, 2020. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.104879



COSTA, J.; PEREIRA, G.; SILVA, M.E.S.; CARDOZO, F.; SILVA, V.V. Validação dos dados de precipitação estimados pelo CHIRPS. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.24, n.15, p.228-243, 2019. DOI: 10.5380/abclima.v24i0.60237

ISLAM, A. Statistical comparison of satellite-retrieved precipitation products with rain gauge observations over Bangladesh. **International Journal of Remote Sensing**, v.39, n.9, p.2906-2936, 2018. DOI: 10.1080/01431161.2018.1433890

MARENGO, J.A. Characteristics and spatial-temporal variability of the Amazon River Basin water budget. **Climate Dynamics**, Heidelberg, v.24, n.1, p.11-22, 2005. DOI: 10.1007/s00382-004-0461-6

MARENGO, J.A.; SOUZA, C.A.; THONICKE, K.; BURTON, C.; HALLADAY, K.; BETTS, R.A.; ALVES, L.M.; SOARES, W.R. Changes in climate and land use over the Amazon Region: Current and future variability and trends. **Frontier in Earth Sciences**, Lausanne, v.6, n.1, p.1-22, 2018. DOI: 10.3389/feart.2018.00228

MU, Y.; JONES, C. An observational analysis of precipitation and deforestation age in the Brazilian Legal Amazon. **Atmospheric Research**, v.271, n.4, p.106122, 2022. DOI: 10.1016/j.atmosres.2022.106122

PAREDES-TREJO, F.J.; BARBOSA, H.A.; KUMAR, T.V.L. Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil. **Journal of Arid Environments**, v.139, p.26-40, 2017. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2016.12.009

SALATI, E.; VOSE, P.B. Amazon Basin: a system in equilibrium. **Science**, New York, v.225, n.4658, p.129-138, 1984. DOI: 10.1126/science.225.4658.129

SILVA; E.R.M.; BARBOSA; I.C.C.; SILVA; H.J.F.; COSTA; L.G. S.; ROCHA, E.J.P. Análise do desempenho da estimativa de precipitação do Produto CHIRPS para a sub-bacia do rio Apeú, Castanhal-PA. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v.13, n.3, p.1094-1105, 2020. DOI: 10.26848/rbgf.v13.3.p1094-1105

VARELLA, MD. Biodiversidade: o Brasil e o quadro internacional. **Revista Brasileira de Política Internacional**, Brasília, v.40, n.1, p.123-145, 1997. DOI: 10.1590/S0034-73291997000100005

XAVIER, A.C.F.; RUDKE, A.P.; SERRÃO, E.A.O.; TERASSI, P.M.B.; PONTES, P.R.M. Evaluation of satellite-derived products for the daily average and extreme rainfall in the Mearim river drainage basin (Maranhão, Brazil). **Remote Sensing**, v.13, n.21, p.4393, 2021. DOI: 10.3390/rs13214393