AVALIAÇÃO DE PRODUTOS GLOBAIS DE PRECIPITAÇÃO NA MODELAGEM DO ÍNDICE DE CONCENTRAÇÃO DE CHUVAS (PCI) EM PALMARES-PE

Luis Felipe Francisco Ferreira da Silva [1] ; Ivanildo Batista da Silva Júnior [2]; Gabriel Graciano de Mendonça[3]; Antônio Samuel Alves da Silva[4]

RESUMO- A compreensão da distribuição temporal e da sazonalidade das chuvas é tão vital para o planejamento hidrológico quanto a mensuração de seus volumes totais. Este estudo avaliou a capacidade de 11 bases de dados globais satélites e reanálises em estimar o Índice de Concentração de Precipitação (PCI) anual para o município de Palmares, Pernambuco, inserido na bacia do rio Una. Utilizou-se como referência a série histórica observada em grade BRDWGD (1983–2022). A metodologia consistiu no cálculo do PCI e na aplicação de sete métricas estatísticas (r, R^2, RMSE, ME, d, KGE e PBIAS), seguidas por uma Análise de Agrupamento Hierárquico multivariada método de Ward. Os resultados revelaram que o produto CPC apresentou o melhor desempenho geral, reproduzindo fielmente a variabilidade temporal do índice (KGE = 0,87). O produto TERRA demonstrou uma surpreendente capacidade em captar o padrão de concentração das chuvas (KGE = 0,79), contrastando com seu conhecido desempenho insatisfatório para volumes. Em contrapartida, as reanálises ERA5 e MERRA2 suavizaram artificialmente a sazonalidade (subestimando o PCI), enquanto o satélite CCS superestimou drasticamente a concentração temporal (PBIAS = 52,9%). Conclui-se que a validação local do PCI é indispensável para selecionar ferramentas remotas seguras voltadas ao monitoramento de extremos climáticos e salvaguarda hidrologica na Zona da Mata sul-pernambucana.

[1]) Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada, Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife - PE, CEP: 52171-900. Fone: (82) 9 9934-9312 E-mail: luis.francisco@ufrpe.br
[2]) Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada, Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife - PE, CEP: 52171-900. E-mail:Ivanildo..batista13@gamil.com
[3]) Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada, Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife - PE, CEP: 52171-900. E-mail:gabriel.gracianom@ufrpe.br
[4]) Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada, Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife - PE, CEP: 52171-900. E-mail:antonio.sasilva@ufrpe.br

Palavras-chave: Sazonalidade climática; Sensoriamento remoto; Análise multivariada; Monitoramento hidroambiental; Recursos hídricos.

ABSTRACT-Understanding the temporal distribution and seasonality of rainfall is as vital for hydrological planning as measuring total volumes. This study evaluated the capability of 11 global datasets satellites and reanalyses to estimate the annual Precipitation Concentration Index PCI for the municipality of Palmares, Pernambuco state, located in the Una River basin. The observed gridded historical series BRDWGD (1983–2022) was used as reference. The methodology consisted of calculating the PCI and applying seven statistical metrics (r, R^2, RMSE, ME, d, KGE, and PBIAS), followed by a multivariate Hierarchical Cluster Analysis Ward's method. The results revealed that the CPC product showed the best overall performance, faithfully reproducing the temporal variability of the index (KGE = 0.87). The TERRA product demonstrated a surprising ability to capture the rainfall concentration pattern (KGE = 0.79), contrasting with its known unsatisfactory performance for volumes. Conversely, the ERA5 and MERRA2 reanalyses artificially smoothed the seasonality (underestimating the PCI), while the CCS satellite drastically overestimated the temporal concentration (PBIAS = 52.9%). It is concluded that local validation of the PCI is indispensable for selecting reliable remote sensing tools aimed at monitoring climate extremes and promoting hydrologic safety in the southern Zona da Mata of Pernambuco.

Keywords: Climate seasonality; Remote sensing; Multivariate analysis; Hydro-environmental monitoring; Water resources.

1- INTRODUÇÃO

O Nordeste brasileiro destaca-se pela sua acentuada vulnerabilidade a extremos climáticos, caracterizando-se por regimes de precipitação marcados por uma forte irregularidade temporal e espacial Araújo *et al.* (2024). Inserida nesse contexto, a Zona da Mata de Pernambuco abriga bacias hidrográficas estratégicas, a exemplo da bacia do rio Una, que enfrentam desafios complexos e crescentes de governança hídrica. Historicamente, essa região sofre de maneira recorrente com episódios severos e antagônicos, alternando entre cheias devastadoras que afetam drasticamente a população e a infraestrutura urbana e rural e estiagens prolongadas Ribeiro Neto *et al.* (2024).

Nesse cenário de instabilidade, compreender detalhadamente de que forma as precipitações se distribuem e se concentram ao longo dos meses do ano torna-se um requisito tão crítico para o

planejamento hidrológico quanto a simples quantificação do volume anual acumulado. Uma distribuição de chuvas altamente concentrada em curtos períodos eleva exponencialmente o risco de desastres naturais e erosão do solo, enquanto volumes mais bem distribuídos favorecem a recarga de aquíferos e a segurança hídrica. No entanto, devido à escassez histórica de redes de monitoramento pluviométrico *in situ* que sejam contínuas, confiáveis e de alta densidade espacial, o uso de estimativas derivadas de sensores remotos orbitais e de modelos de reanálise global consolidou-se como uma alternativa tecnológica indispensável Araújo *et al.* (2025).

Contudo, a literatura especializada aponta que a modelagem matemática da distribuição intra-anual das chuvas impõe severas restrições e vieses aos algoritmos desses produtos remotos. A capacidade de representar adequadamente esses padrões hidrometeorológicos varia consideravelmente a depender da escala espacial adotada, das limitações dos sensores e das complexas características físicas e orográficas em nível regional Banimfreg *et al.* (2025). Como resultado, diferentes produtos podem apresentar divergências significativas na captura da verdadeira sazonalidade local, gerando incertezas na aplicação desses dados.

Diante dessa lacuna, faz-se imperativa uma validação estatística rigorosa e comparativa desses modelos frente a bases terrestres observacionais homogêneas. Sendo assim, o presente estudo objetiva avaliar a acurácia e a adequação de onze produtos globais de precipitação (CCS, CHIRPS, CPC, CRU, ERA5, GPCC, GPCP, MERRA2, MSWEP, PERSIANN e TERRA) em representar o Índice de Concentração de Precipitação (PCI) no município de Palmares-PE. Para tal, empregam-se métricas quantitativas clássicas de erro e correlação combinadas à análise multivariada de agrupamento, visando identificar os produtos mais aderentes à realidade local e, consequentemente, subsidiar a tomada de decisões seguras e eficientes no monitoramento hidrológico regional.

2- MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

O estudo localiza-se no município de Palmares, território que integra a mesorregião da Mata Sul Pernambuco e inserido na bacia hidrográfica do rio Una. O município compreende uma extensão de 339,388 km², cujo arcabouço geomorfológico é dominado por feições de relevo IBGE (2020). Conforme a classificação de Köppen, o regime climatológico local é enquadrado como do tipo *As* (tropical com verão seco), exibindo uma marcada sazonalidade na qual os maiores aportes pluviais concentram-se historicamente entre os meses de outono e inverno. O período chuvoso na região estende-se de março a agosto, concentrando a maior parte da precipitação média anual do município,

que gira em torno de 1.300 mm Freitas *et al.* (2015). Esse padrão de distribuição da precipitação desempenha um papel determinante na dinâmica local, influenciando diretamente o planejamento urbano e a gestão de riscos hidrológicos na região. Para a condução das análises espaciais, adotou-se o limite políticos disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Sobre esta malha vetorial, foi executado o cruzamento e o recorte geográfico das bases de dados de precipitação em grade. O procedimento resultou na intersecção de 4 *pixels* incidentes sobre o perímetro municipal, cujos valores integrados foram utilizados para compor a série temporal da precipitação média da área de estudo.

2.2 Bases de Dados

Para o cálculo e validação do padrão de distribuição temporal das chuvas, extraíram-se as séries mensais de precipitação (1983 a 2022) de onze produtos globais de dados meteorológicos : CCS (0,04°), CHIRPS (0,05°), CPC (0,5°), CRU (0,5°), ERA5 (0,25°), GPCC (0,25°), GPCP (2,5°), MERRA2 (0,5° x 0,625°), MSWEP (0,1°), PERSIANN (0,25°) e TERRA (1/24°). Como referência observada de superfície, adotou-se a base em grade *Brazilian Daily Weather Gridded Data* (BRDWGD), proposta por Xavier *et al.* (2022). Apesar de ser um produto já validado por diversos autores, o uso do BRDGWGD como referência apresenta limitações que devem ser consideradas. Por ser um produto gerado a partir de interpolação espacial de dados de estações pluviométricas, a densidade irregular da rede de monitoramento pode introduzir incertezas, onde os resultados podem ser suavizados, tais características devem ser ponderadas ao avaliar o produto. Amostragem espacial foi conduzida em ambiente computacional R através da interseção da malha municipal de Palmares-PE, totalizando 4 pixels incidentes sobre a área de estudo.

A caracterização da sazonalidade pluviométrica interanual foi realizada por meio do cálculo do Índice de Concentração de Precipitação (PCI) proposto por Oliver (1980) anual para a base observada e para cada produto avaliado, utilizando as funções do pacote *precintcon*. O PCI foi quantificado conforme a Equação (1):

$$PCI = 100\,x\,\frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{\left(\sum_{i=1}^{12} Pi\right)^2} \quad (1)$$

onde Pi representa a precipitação acumulada no mês i (variando de 1 a 12). Valores de PCI indicam se a chuva do ano foi uniformemente distribuída ou fortemente concentrada em poucos meses.

2.3 Análise Estatística e Agrupamento Multivariado

A validação quantitativa das séries anuais do PCI estimadas pelas bases remotas foi efetuada através do confronto direto com o PCI calculado a partir da base BRDWGD. Foram adotados sete métricas

estatísticas de desempenho, definidas pelas equações de (2) a (8). Nas formulações, Oi denota o PCI observado, Si o PCI estimado, $\bar{O}$ e $\bar{S}$ representam suas respectivas médias amostrais, e n corresponde ao número de anos analisados (40 anos).

Coeficiente de Correlação de Pearson (r):

Mede o grau de correlação linear entre os dados estimados e observados.

$$r = \frac{\sum(Oi-\bar{O})(Si-\bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Oi-\bar{O})^2 \sum(Si-\bar{S})^2}} \quad (2)$$

Coeficiente de Determinação (R^2):

Indica a proporção da variância nos dados observados que é explicada pelo produto remoto.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(Oi-\bar{O})(Si-\bar{S})}{\sum_{i=1}^{n}(Oi-\bar{O})^2 \sum_{i=1}^{n}(Si-\bar{S})^2}\right)^2 \quad (3)$$

Raiz do Erro Quadrático Médio ($RMSE$):

Quantifica a magnitude média dos erros, penalizando discrepâncias maiores.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Si - Oi)^2} \quad (4)$$

Erro Médio (ME):

Indica a tendência média do produto em superestimar (valores positivos) ou subestimar (valores negativos) os dados reais.

$$ME = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Si - Oi) \quad (5)$$

Índice de Concordância de Willmott (d):

Avalia o grau de exatidão das estimativas, variando de 0 (nenhuma concordância) a 1 (concordância perfeita).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Si-Oi)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|Si-\bar{O}|+|Oi-\bar{O}|)^2} \quad (6)$$

Eficiência de Kling-Gupta (KGE):

Métrica robusta que integra a correlação, o viés e a variabilidade em um único índice.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (7)$$

Sendo $\alpha = \frac{\sigma s}{\sigma O}$ (razão entre o desvio padrão dos dados simulados e observados) e $\beta = \frac{\bar{S}}{\bar{0}}$ razão entre as medidas.

Viés Percentual ($PBIAS$):

Mede a tendência percentual média dos dados simulados em relação aos observados.

$$PBIAS = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(Si-Oi)}{\sum_{i=1}^{n} Oi}\right) x\ 100 \quad (8)$$

Por fim, as métricas de desempenho foram padronizadas (Z-score) e submetidas a análise de Agrupamento Hierárquico. Foi utilizado a distância euclidiana para quantificar a diferença espacial e magnitude dos erros entre os produtos. O método de Ward foi adotado como critério de ligação do pacote factoextra, justificado por minimizar a variância interna de cada cluster garantindo a formação de grupos com coerência conforme a similaridade de seus desempenhos de subestimativa e superestimativa.

3- RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Desempenho na Estimativa do Índice de Concentração de Precipitação (PCI)

A modelagem de como a precipitação se distribuiu ao longo dos anos revelou divergências marcantes em comparação com avaliações estritamente volumétricas tradicionais (Figura 1).

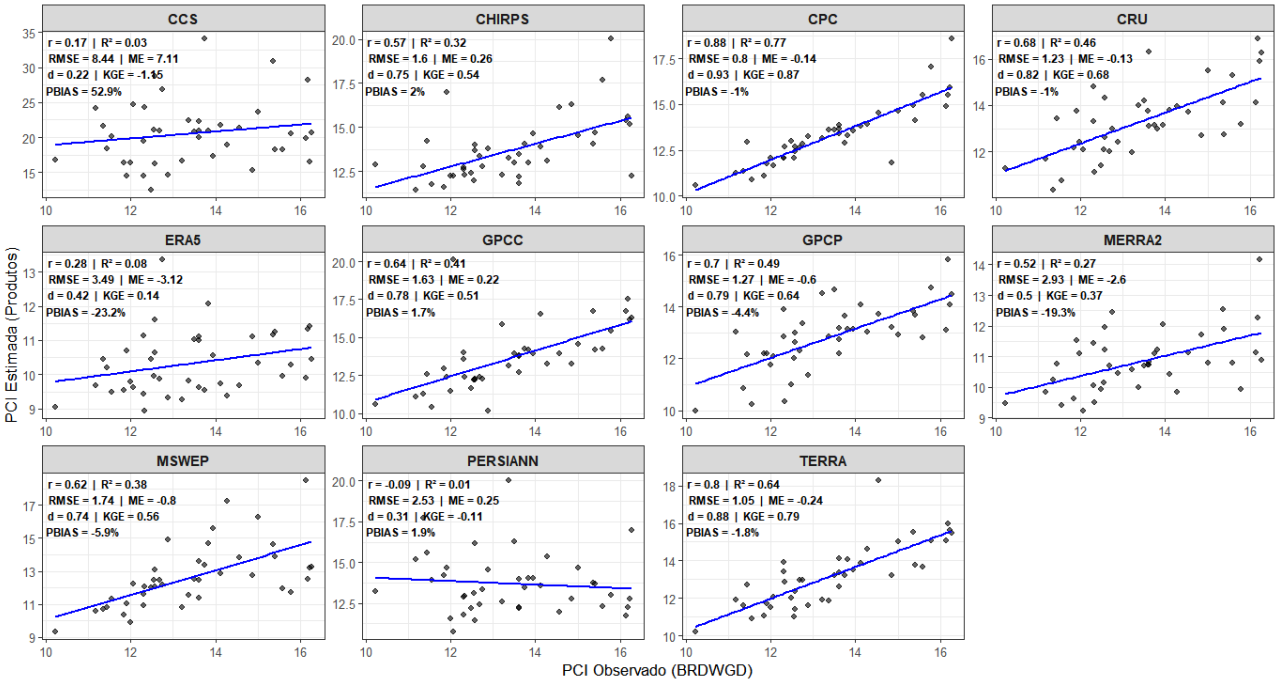


Figura 1 - Gráficos de dispersão e métricas estatísticas do PCI estimado pelos produtos globais versus o observado (BRDWGD) para Palmares-PE.

O produto CPC confirmou sua superioridade estatística para o monitoramento da bacia, registrando a maior eficiência de Kling-Gupta (KGE = 0,87), o maior coeficiente de correlação (r =

0,88) e o menor erro médio quadrado (RMSE = 0,80), acompanhado por um viés percentual quase nulo (PBIAS = -1%). Um achado de grande relevância metodológica foi o comportamento do modelo TERRA: embora o produto apresente conhecidas limitações para quantificar o volume de água precipitada, obteve o segundo melhor desempenho no índice de sazonalidade (KGE = 0,79; r = 0,80; PBIAS = -1,8%), captando com elevada acurácia a dinâmica temporal de distribuição das chuvas. As bases CRU (KGE = 0,68) e GPCP (KGE = 0,64) também apresentaram desempenhos satisfatórios.

Em um patamar intermediário de concordância, situaram-se os produtos MSWEP (KGE = 0,56), CHIRPS (KGE = 0,54) e GPCC (KGE = 0,51). Tais modelos sofreram perdas visíveis de eficiência decorrentes de um aumento na dispersão dos resíduos amostrais, sugerindo uma maior incerteza na captação de picos de concentração interanuais.

Por fim, CCS, ERA5, MERRA2 e PERSIANN revelaram falhas atreladas aos seus algoritmo e resolução frente ao clima sazonal local. O CCS (KGE = -1,15) superestimou o índice (PBIAS = 52,9%). Resultado típico de sensores que usam infravermelho que confundem topos de nuvens frias com chuvas intensas. Oposto a isso, as reanálises ERA5 e MERRA2 apresentaram vieses negativos persistentes (PBIAS de -23,2% e -19,3%), atestando uma suavização artificial da sazonalidade local. Sem correlação estatística com a realidade de campo, o PERSIANN isolou-se por sua inaptidão temporal (r = -0,09).

3.2 Análise de Agrupamento Hierárquico do PCI

A aplicação do método multivariado de agrupamento permitiu compartimentar os produtos de acordo com a assinatura de seus erros na modelagem do PCI, resultando na formação de quatro grupos bem delimitados Figura 2.

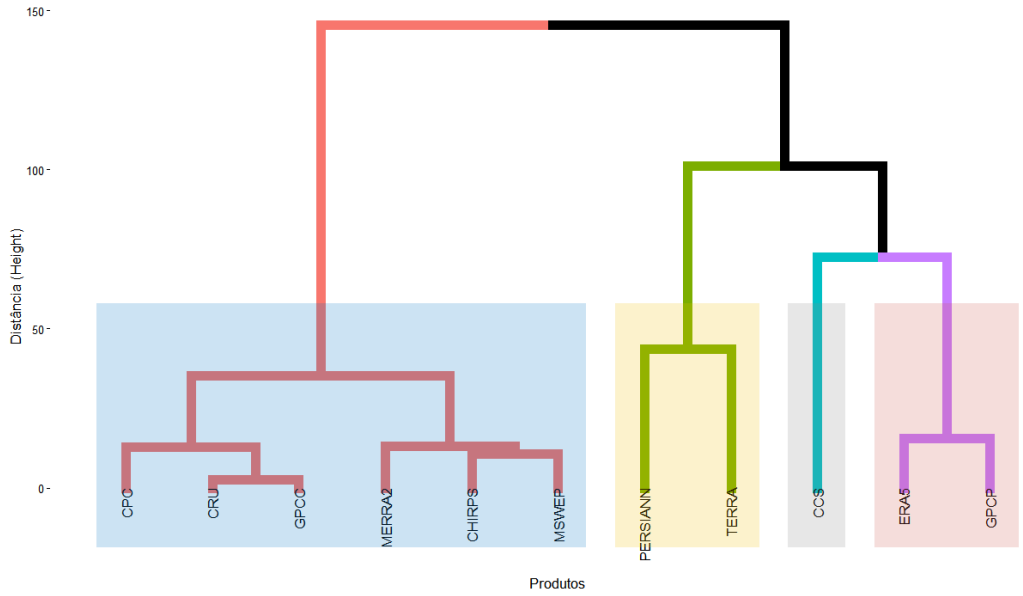


Figura 2 – Dendrograma de Similaridade dos produtos para o CPI.

O primeiro *cluster* (bloco azul) congregou o maior número de ferramentas: CPC, CRU, GPCC, MERRA2, CHIRPS e MSWEP. A reunião destas bases indica que, a despeito de variações de acurácia interna, elas compartilham similaridade estrutural e captam de forma coerente a tendência central da dinâmica pluviométrica na Zona da Mata. O segundo grupo (bloco rosa) associou a reanálise ERA5 e o satélite GPCP, distanciando-os do núcleo principal em função da magnitude e da natureza de suas respostas de erro.

O terceiro agrupamento uniu PERSIANN e TERRA bloco amarelo. Este arranjo evidencia o poder analítico da estatística multivariada: embora o TERRA detenha boa correlação linear isolada, o algoritmo detectou que a topologia de suas distâncias euclidianas globais o aproxima das características estruturais do PERSIANN, segregando-os dos modelos mais robustos. No extremo oposto, confirmando as distorções apontadas nas métricas quantitativas, o produto CCS estabeleceu isoladamente o quarto *cluster* bloco cinza. A elevada distância vertical no dendrograma corrobora o comportamento severamente anômalo do modelo frente à realidade observada (BRDWGD).

3.3 Comportamento Interanual do Índice de Concentração de Precipitação (PCI)

A evolução interanual do PCI mostrado na Figura 3 ilustra visualmente a sincronia dos modelos frente aos anos de maior ou menor concentração de chuvas na área de estudo.

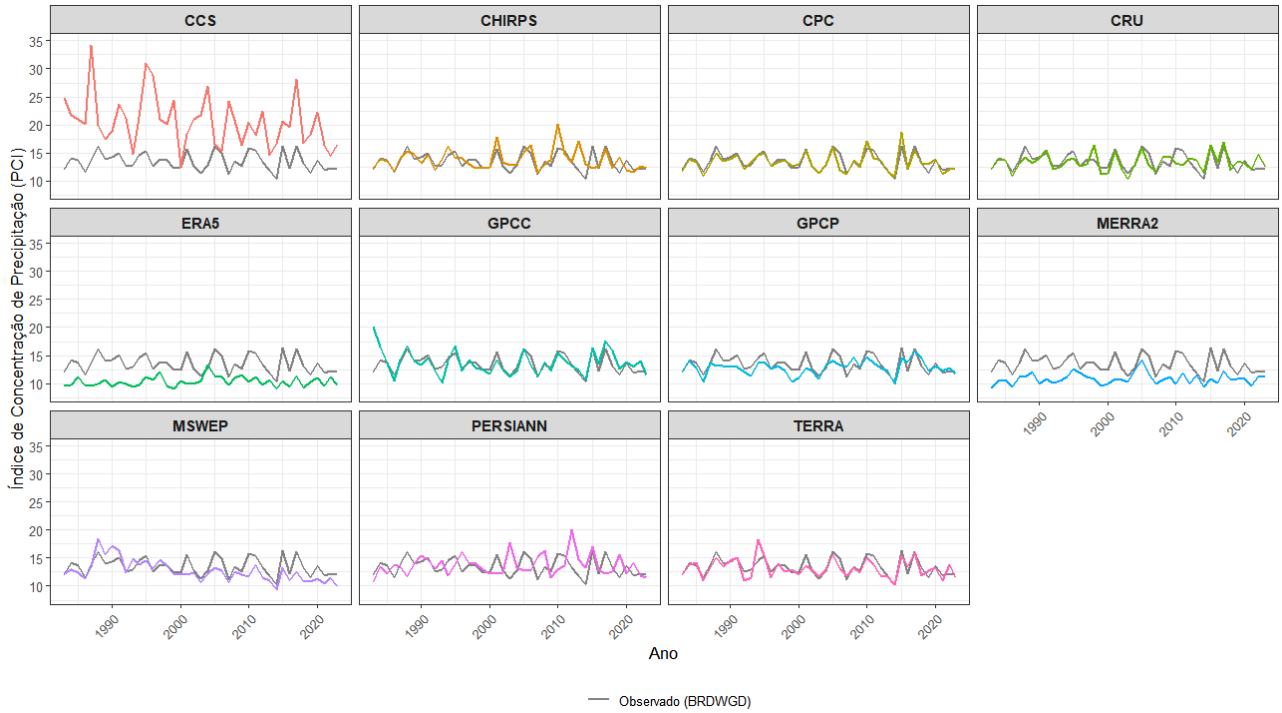


Figura 3 – Evolução do índice de concentração da precipitação para 11 modelos de precipitação de 1982-2022.

Graficamente, o CPC confirma seu desempenho superior, com uma sobreposição quase perfeita à série observada (BRDWGD), acompanhando fielmente seus picos e vales. TERRA, CRU e GPCC também exibem boa aderência visual aos ciclos locais.

Em contrapartida, as reanálises ERA5 e MERRA2 evidenciam um viés sistemático negativo, posicionando-se persistentemente abaixo da linha de referência, o que comprova uma suavização artificial da sazonalidade. O comportamento mais crítico é o do CCS, cuja curva projeta-se totalmente descolada da observação (com picos > 25), superestimando drasticamente a concentração dos eventos. Por fim, o PERSIANN revela oscilações erráticas e invertidas em relação à base terrestre, refletindo visualmente sua correlação negativa.

4- CONCLUSÃO

A avaliação do Índice de Concentração de Precipitação (PCI) ao longo de uma série histórica de 40 anos revelou que os algoritmos de sensoriamento remoto e reanálise apresentam respostas heterogêneas e complexas para representar a sazonalidade na bacia do rio Una.

Conclui-se que o produto CPC constitui a ferramenta mais acurada e recomendada para mimetizar os padrões de distribuição temporal e concentração das chuvas na Zona da Mata Sul-pernambucana.

Complementarmente, o modelo TERRA desponta como uma opção altamente viável para estudos sazonais, a despeito de suas conhecidas fragilidades de estimativa volumétrica absoluta.

Por outro lado, reanálises globais consolidadas como ERA5 e MERRA2 suavizam a variabilidade intra-anual, demandando calibrações locais severas, enquanto os produtos CCS e PERSIANN devem ter seu uso evitado para esta aplicação devido a anomalias críticas e inversões de tendência temporal.

Por fim, ressalta-se que a identificação de bases temporalmente precisas, como CPC, aliado á estatística multivariada, fornece informações indispensáveis para a governança na Bacia do rio Una. Visto que a representação fiel da sazonalidade otimiza a tomada de decisão no monitoramento hidrológico e calibra os sistemas de alertas da Defesa Civil, mitigando incertezas hidrológicas e subsidiar a gestão de riscos associados a extremos climáticos.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, C. S. P.; SILVA, J. R. I.; ALMEIDA, C. D. G. C. (2025). "Dados de precipitação total e temperatura do ar obtidos da reanálise ERA5-Land: validação e exatidão". Revista Caatinga 38.

BANIMFREG, B.; DAMIANI, E.; GOROOH, V. A. *et al.* (2025). "Abordagem inovadora para estimativa quantitativa de precipitação (QPE) baseada em dados de estações de medição em climas áridos: comparação entre redes neurais e métodos tradicionais". Revista de Big Data 12(1).

FREITAS, L. O. L.; SOARES, D. B.; NÓBREGA, R. S. (2015). "Variabilidade temporal e espacial da precipitação pluviométrica em Pernambuco através de índices de extremos climáticos". Revista Brasileira de Meteorologia 30(2), pp. 153-168.

IBGE (2020). Brasil em Síntese: Território. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

OLIVER, J. E. (1980). "Distribuição mensal da precipitação: um índice comparativo". The Professional Geographer 32(3), pp. 300-309.

RIBEIRO NETO, A.; CIRILO, J. A.; DANTAS, C. E. O.; SILVA, E. R. (2024). "Caracterização da formação de cheias na bacia do rio Una em Pernambuco: simulação hidrológica-hidrodinâmica". Revista Brasileira de Recursos Hídricos 29, pp. 1-12.

SILVA, J. M.; SOUZA, L. S. (2024). "Índice de irregularidade temporal das chuvas no território do Brasil". Revista de Gestão de Água da América Latina (REGA) 21.

XAVIER, A. C.; SCANLON, B. R.; KING, C. W.; ALVES, A. I. (2022). "New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020)". International Journal of Climatology 42(16), pp. 8390-8404.