

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel”
Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da
Água



Dissertação

Dados Globais para modelagem hidrológica: Uma revisão sobre os produtos de precipitação disponíveis para a América do Sul e simulação hidrológica com o BEST para a Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã (Sul do Brasil)

Rayane Ribeiro Vieira

Pelotas, 2026

Rayane Ribeiro Vieira

Dados Globais para modelagem hidrológica: Uma revisão sobre os produtos de precipitação disponíveis para a América do Sul e simulação hidrológica com o BEST para a Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã (Sul do Brasil)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel” da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador (a): Danielle Almeida de Bressiani

Pelotas, 2026

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

V657d Vieira, Rayane Ribeiro

Dados globais para modelagem hidrológica [recurso eletrônico] : uma revisão sobre os produtos de precipitação disponíveis para a América do Sul e simulação hidrológica com o BEST para a Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã (Sul do Brasil) / Rayane Ribeiro Vieira ; Danielle de Almeida Bressiani, orientadora. — Pelotas, 2026.

80 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2026.

1. Precipitação por satélite. 2. Calibração paramétrica. 3. Curva de permanência. 4. Eficiência estatística. 5. Variabilidade hidrológica. I. Bressiani, Danielle de Almeida, orient. II. Título.

CDD 574.52632

Rayane Ribeiro Vieira

Dados Globais para modelagem hidrológica: Uma revisão sobre os produtos de precipitação disponíveis para a América do Sul e simulação hidrológica com o BEST para a Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã (Sul do Brasil)

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 04/03/2026

Banca examinadora:

Profa. Dra Danielle de Almeida Bressiani (Orientador)
Doutora em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo

Profa. Dra Maria Cândida Moitinho Nunes
Doutora em Ciência do Solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr André Becker Nunes
Doutor em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

À Maria Beatriz, minha tia, que hoje vive nas minhas saudades mais profundas e nas lembranças que guardo com todo amor. Sua ausência deixou um vazio imenso, mas também uma força silenciosa que me acompanhou em cada desafio desta caminhada. Esta conquista carrega a sua presença em cada página e se torna uma forma de eternizar tudo o que representou na minha vida.

Resumo

VIERIA, Rayane Ribeiro. **Dados Globais para modelagem hidrológica: Uma revisão sobre os produtos de precipitação disponíveis para a América do Sul e simulação hidrológica com o BEST para a Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã (Sul do Brasil).** 2026. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel”, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2026.

A modelagem hidrológica constitui ferramenta fundamental para o planejamento e a gestão de recursos hídricos, especialmente em regiões caracterizadas por variabilidade climática e limitações na disponibilidade de dados observacionais. Esta dissertação teve como objetivo analisar como a representação da precipitação e a configuração estrutural de modelos hidrológicos influenciam a simulação da vazão na Bacia do Rio Camaquã, avaliando diferentes produtos de precipitação disponíveis para a América do Sul e o uso de dados globais em simulações hidrológicas com o modelo SWAT. O primeiro consistiu em revisão sistemática da literatura acerca da aplicação de produtos de precipitação na modelagem hidrológica na América do Sul, identificando padrões de desempenho, limitações metodológicas e impactos das resoluções espaciais nas simulações de vazão. Os resultados indicaram que a qualidade e a resolução dos dados de precipitação influenciam diretamente nas métricas estatísticas de desempenho, sendo essencial a avaliação crítica das incertezas associadas a produtos satelitais. O segundo capítulo apresentou análise comparativa entre modelo hidrológico calibrado e modelo executado em condição pré-calibração na Bacia do Rio Camaquã/RS. Foram utilizadas métricas como NSE, PBIAS, RMSE e KGE, além da análise da curva de permanência e do teste de tendência de Mann–Kendall. O modelo calibrado apresentou NSE = 0,79 no passo mensal e viés praticamente nulo, enquanto o modelo pré-calibrado apresentou NSE = 0,405, PBIAS = +46,3% e KGE = 0,502. Apesar da superestimação sistemática das vazões médias e mínimas, o modelo pré-calibrado preservou a sazonalidade mensal, a forma geral da curva de permanência e a direção da tendência interanual. Conclui-se que a confiabilidade da modelagem hidrológica depende simultaneamente da qualidade dos dados de entrada e do ajuste paramétrico do modelo. Embora a calibração seja essencial para precisão quantitativa, a representação dos processos hidrológicos permite captar padrões estruturais do regime mesmo antes da otimização. A pesquisa contribui para o aprimoramento metodológico da modelagem hidrológica aplicada às bacias hidrológicas e oferece subsídios para sua utilização no apoio à gestão dos recursos hídricos.

Palavras-chave: precipitação por satélite; calibração paramétrica; curva de permanência; eficiência estatística; variabilidade hidrológica.

Abstract

VIEIRA, Rayane Ribeiro. **Global Data for Hydrological Modeling: A Review of Precipitation Products Available for South America and Hydrological Simulation with BEST for the Camaquã River Basin (Southern Brazil)**. 2026. Dissertation (Master degree in Sciences) - Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel”, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2026.

Hydrological modeling is a fundamental tool for water resources planning and management, especially in regions characterized by climate variability and limited availability of observational data. This dissertation aimed to analyze how the representation of precipitation and the structural configuration of hydrological models influence streamflow simulation in the Camaquã River Basin, evaluating different precipitation products available for South America and the use of global data in hydrological simulations with the SWAT model. The first part consisted of a systematic literature review on the application of precipitation products in hydrological modeling in South America, identifying performance patterns, methodological limitations, and the impacts of spatial resolution on streamflow simulations. The results indicated that the quality and resolution of precipitation data directly influence statistical performance metrics, highlighting the importance of critically assessing uncertainties associated with satellite-based products. The second chapter presented a comparative analysis between a calibrated hydrological model and a model run under pre-calibration conditions for the Camaquã River Basin (RS, Brazil). Metrics such as NSE, PBIAS, RMSE, and KGE were used, along with flow duration curve analysis and the Mann–Kendall trend test. The calibrated model achieved $NSE = 0.79$ at the monthly time step and nearly zero bias, whereas the pre-calibrated model showed $NSE = 0.405$, $PBIAS = +46.3\%$, and $KGE = 0.502$. Despite systematically overestimating mean and low flows, the pre-calibrated model preserved monthly seasonality, the general shape of the flow duration curve, and the direction of the interannual trend. It is concluded that the reliability of hydrological modeling depends simultaneously on the quality of input data and the model's parameter calibration. Although calibration is essential for quantitative accuracy, the representation of hydrological processes allows capturing structural patterns of the flow regime even prior to optimization. This research contributes to methodological improvements in hydrological modeling applied to river basins and provides support for its use in water resources management.

Keywords: Satellite precipitation; Parameter calibration; Flow duration curve; Statistical efficiency; Hydrological variability.

Lista de Figuras

Figura 1 - Localização dos países da América do Sul.....	20
Figura 2 - Fluxograma de identificação e seleção dos artigos	25
Figura 3 - Fluxograma das etapas de identificação, triagem e seleção dos artigos utilizados na revisão sistemática do objeto de estudo (n = número de artigos)	25
Figura 4 - Evolução temporal das publicações científicas sobre produtos de precipitação na América do Sul no período de 2015 a 2025 nas bases de dados Web of Science e Scopus.....	28
Figura 5 - Distribuição espacial dos estudos segundo países da América do Sul.....	29
Figura 6 - Frequência das principais palavras-chave em estudos sobre precipitação na América do Sul (Scopus, 2015–2025).....	31
Figura 7 - Distribuição dos diferentes produtos de precipitação empregados nos estudos científicos, de acordo com a área temática.....	38
Figura 8 - Número de artigos segundo a quantidade de produtos de precipitação utilizados	40
Figura 9 - Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã	48
Figura 10 - Interface da plataforma BEST com a delimitação automática da Bacia do Rio Camaquã e informações da área modelada	52
Figura 11 - Fluxograma metodológico da comparação e avaliação do desempenho de modelos hidrológicos.....	53
Figura 12 - Série anual observada vs. Simulada.....	57
Figura 13 - Série mensal observada vs. simulada.....	57
Figura 14 - Distribuição dos Fluxos Hidrológicos no Modelo BEST	60
Figura 15 - Curva de permanência.....	61
Figura 16 - PBIAS por classes de vazão	62
Figura 17 - Tendência anual das vazões	63

Lista de Quadros

Quadro 1 - Fontes institucionais de dados meteorológicos e hidrológicos na América do Sul	22
Quadro 2 - Síntese Comparativa dos Principais Produtos de Precipitação Utilizados em Estudos Hidrológicos.....	34
Quadro 3 - Períodos de simulação e dados hidrológicos utilizados no estudo	51

Sumário

1. Introdução.....	10
2. Objetivos.....	12
3. Hipótese.....	12
4. Revisão da Literatura.....	13
5. Capítulos.....	16
5.1. Capítulo 1 - Produtos de Precipitação na América do Sul: Revisão Sistemática das Aplicações, Limitações e Avanços Recentes.....	16
5.2. Capítulo 2 - Resposta Hidrológica da Bacia do Rio Camaquã sob Diferentes Abordagens Metodológicas.....	46
6. Considerações Finais	68
7. Referências.....	70

1. Introdução

O ciclo hidrológico corresponde ao conjunto de processos responsáveis pela circulação contínua da água entre a atmosfera, a superfície terrestre e os sistemas subterrâneos (Paez, 2023). Esses processos, como evaporação, condensação, precipitação, infiltração, armazenamento e escoamento, ocorrem de forma interdependente e são condicionados por fatores climáticos, físicos e antrópicos. Em escala de bacia hidrográfica, o ciclo hidrológico pode ser compreendido como um sistema integrado no qual a água que ingressa por meio da precipitação é transformada, armazenada e redistribuída até convergir para um ponto de saída comum (Zhang *et al.*, 2024).

A precipitação constitui a principal forma de entrada de água em bacias hidrográficas e exerce influência direta sobre a dinâmica dos processos internos, como a infiltração no solo, a evapotranspiração e a geração de escoamento superficial e subterrâneo (Alemu; Bawoke, 2020). Em regiões subtropicais, como o sul do Brasil, a variabilidade das chuvas é marcada pela alternância entre períodos de elevada pluviosidade e estiagens prolongadas, além da ocorrência de eventos intensos associados a diferentes sistemas atmosféricos. Essa variabilidade influencia significativamente a disponibilidade hídrica e o comportamento das bacias hidrográficas (Martins; Alcântara, 2024; Meireles, 2023; Zezzo; Coltri, 2022).

A vazão, por sua vez, representa a resposta integrada da bacia às condições climáticas e às suas características físicas, refletindo a interação entre relevo, solo, cobertura vegetal e intervenções humanas. A análise das séries de vazão permite identificar padrões sazonais, tendências ao longo do tempo e eventos extremos, sendo essencial para o planejamento do uso da água e para a gestão dos recursos hídricos.

Apesar da relevância dessas variáveis, a representação adequada do regime hidrológico enfrenta desafios importantes do Brasil. A distribuição espacial irregular e a baixa densidade de estações hidrometeorológicas limitam a caracterização detalhada da precipitação, enquanto falhas e descontinuidades em séries históricas aumentam as incertezas associadas às análises. Além disso, a complexidade dos sistemas atmosféricos atuantes na região contribui para padrões espaciais de chuva que nem sempre são capturados por medições pontuais.

Nesse contexto, produtos de precipitação derivados de sensoriamento remoto têm sido utilizados como fontes complementares de informação, oferecendo cobertura

espacial contínua e maior frequência temporal de dados radares (Costa *et al.*, 2019). Embora ampliem a disponibilidade de informações, esses produtos apresentam diferenças metodológicas e incertezas que podem influenciar as análises hidrológicas (Araújo *et al.*, 2022).

Paralelamente, a modelagem hidrológica constitui uma ferramenta essencial para integrar dados e representar os processos que controlam a dinâmica da água em uma bacia. Modelos hidrológicos permitem simular o balanço hídrico a partir de variáveis climáticas e características físicas do território, contribuindo para a análise de cenários, avaliação de impactos e apoio à tomada de decisão. Entretanto, os resultados obtidos dependem tanto da qualidade dos dados utilizados quanto da forma como os processos hidrológicos são representados nos modelos climáticos (Zhang *et al.*, 2022).

O SWAT+ (Soil and Water Assessment Tool) é um modelo hidrológico semi-distribuído utilizado para simular o balanço hídrico em bacias hidrográficas ao longo do tempo. Ele divide a bacia em sub-bacias e HRUs, representando processos como infiltração, evapotranspiração, escoamento superficial e fluxo de base, com propagação da vazão até o exutório. Em aplicações comparativas, pode ser utilizado em versões calibradas, com parâmetros ajustados a dados observados de vazão.

O BEST (Brazilian Ecohydrological Simulation Tool) é uma plataforma baseada no SWAT, desenvolvida para bacias brasileiras e operada em ambiente web. Ele utiliza uma base de dados padronizada e integração de informações espaciais, facilitando sua aplicação, mas com menor flexibilidade de calibração local em relação ao SWAT+.

Assim, compreender de que maneira diferentes fontes de precipitação e distintas estruturas de modelagem influenciam a simulação do regime de vazões torna-se fundamental para reduzir incertezas e aprimorar a confiabilidade das análises hidrológicas. Embora avanços tenham sido alcançados tanto no desenvolvimento de produtos de precipitação quanto na aplicação de modelos hidrológicos, ainda são limitados os estudos que investigam de forma integrada a influência simultânea desses dois fatores sobre a resposta hidrológica, especialmente em bacias do sul do Brasil.

2. Objetivos

2.1. Geral

Avaliar comparativamente abordagens de modelagem hidrológica aplicadas à Bacia do Rio Camaquã, investigando como diferenças estruturais entre modelos influenciam a representação do regime de vazões e sua resposta hidrológica. Contribuir para o entendimento da sensibilidade da modelagem hidrológica às diferenças estruturais entre modelos, fortalecendo a discussão metodológica sobre sua aplicação em bacias do sul do Brasil.

2.2. Específicos

- Realizar uma revisão dos principais produtos de precipitação utilizados em estudos hidrológicos na América do Sul, destacando suas potencialidades e limitações para aplicações em modelagem hidrológica.
- Implementar e configurar o modelo Brazilian Ecohydrological Simulation Tool (BEST) para a Bacia do Rio Camaquã, utilizando dados climáticos e ambientais representativos da região.
- Comparar as respostas hidrológicas obtidas pelos modelos BEST (não calibrado) e SWAT+ calibrado, por meio de um estudo já realizado, investigando como suas diferentes estruturas conceituais influenciam a representação dos processos hidrológicos em uma bacia do sul do Brasil.

3. Hipótese

Hipótese 1

Diferenças entre produtos de precipitação para a América do Sul não se refletem de forma linear no desempenho das simulações de vazão, sendo moduladas pela estrutura do modelo e pelas estratégias de calibração adotadas.

Hipótese 2

A calibração dos parâmetros do modelo SWAT aumenta significativamente a precisão das simulações de vazão; entretanto, mesmo sem calibração, o modelo é capaz de representar padrões hidrológicos estruturais, como sazonalidade e tendências temporais.

4. Revisão da Literatura

A compreensão do funcionamento hidrológico de uma bacia hidrográfica exige o entendimento integrado dos processos que compõem o ciclo da água e das interações entre variáveis climáticas, físicas e antrópicas (Paez, 2023). A bacia hidrográfica é reconhecida como a unidade espacial fundamental para análise hidrológica por representar um sistema naturalmente delimitado por divisores topográficos, no qual toda a água precipitada converge para um ponto comum de saída. Nessa perspectiva, a bacia pode ser interpretada como um sistema aberto, caracterizado por entradas, armazenamentos internos e saídas de água, cuja dinâmica é condicionada por múltiplos fatores ambientais (Tucci, 2002).

O funcionamento hidrológico da bacia pode ser descrito por meio do balanço hídrico, que relaciona precipitação, evapotranspiração, vazão e variação de armazenamento. A precipitação constitui a principal entrada de água no sistema, condicionando processos como infiltração, geração de escoamento superficial e recarga subterrânea. A evapotranspiração representa o principal mecanismo de retorno da água à atmosfera, enquanto a vazão sintetiza a resposta integrada da bacia às condições climáticas e às suas características físicas.

A vazão resulta da combinação de diferentes componentes do escoamento: o escoamento superficial, gerado quando a precipitação excede a capacidade de infiltração do solo; o fluxo lateral, associado ao movimento subsuperficial da água; e o fluxo de base, contribuição mais lenta proveniente dos aquíferos, responsável pela manutenção das vazões em períodos secos. A participação relativa desses componentes depende das propriedades do solo, da topografia, do uso da terra e da intensidade das chuvas (Dingman, 2015).

A precipitação apresenta elevada variabilidade espacial e temporal, especialmente em regiões subtropicais como o sul do Brasil. A atuação de diferentes sistemas atmosféricos, incluindo frentes frias, ciclones extratropicais e eventos convectivos localizados, produz padrões heterogêneos de chuva tanto no espaço quanto no tempo. Essa heterogeneidade implica que a quantidade de precipitação registrada em uma estação pode não representar adequadamente a distribuição da chuva em toda a bacia, particularmente em áreas com baixa densidade de monitoramento (Daneshvar & Freund, 2021). Assim, a representação inadequada da precipitação constitui uma das principais fontes de incerteza em estudos hidrológicos (Ocampo-Marulanda *et al.*, 2022).

O monitoramento hidrometeorológico tradicional baseia-se em redes de estações pluviométricas e fluviométricas que registram, respectivamente, a precipitação e a vazão. Contudo, em diversas regiões do Brasil, a densidade dessas estações é limitada, e as séries históricas frequentemente apresentam falhas, inconsistências ou períodos de descontinuidade (Truta Neto *et al.*, 2023).

Essas limitações comprometem a caracterização da variabilidade espacial da chuva e dificultam etapas fundamentais da modelagem hidrológica, como calibração e validação (Ruezzene *et al.*, 2021). A calibração consiste no ajuste de parâmetros do modelo para reduzir a diferença entre valores simulados e observados, enquanto a validação verifica a capacidade do modelo de reproduzir o comportamento hidrológico em período distinto daquele utilizado no ajuste (Chen; Huang; Huang, 2023).

Diante dessas restrições, produtos de precipitação derivados de sensoriamento remoto têm sido amplamente incorporados a estudos hidrológicos. Esses produtos utilizam sensores orbitais para estimar a chuva a partir de propriedades físicas das nuvens e da atmosfera, oferecendo cobertura espacial contínua e maior frequência temporal de dados (Santos; Andrade Filho; França, 2023).

Embora representem alternativa importante para reduzir lacunas observacionais, esses produtos apresentam diferenças metodológicas relacionadas a algoritmos de estimativa, resolução espacial e técnicas de correção. Tais diferenças podem resultar em erros sistemáticos que, quando utilizados como entrada em modelos hidrológicos, influenciam diretamente a simulação da vazão (Araújo *et al.*, 2022).

A modelagem hidrológica constitui ferramenta essencial para integrar as variáveis do ciclo da água e representar matematicamente os processos que ocorrem em uma bacia. Modelos hidrológicos podem variar quanto ao grau de detalhamento e à forma de representação dos processos (Baltazar *et al.*, 2023). Em termos gerais, distinguem-se modelos conceituais, que utilizam representações simplificadas baseadas em reservatórios teóricos, modelos fisicamente baseados, que descrevem explicitamente os mecanismos físicos e modelos semi-distribuídos, que subdividem a bacia em unidades homogêneas para representar a heterogeneidade espacial (BECK *et al.*, 2017).

Entre os modelos semi-distribuídos destaca-se o Soil and Water Assessment Tool (SWAT), amplamente utilizado em estudos ambientais e de recursos hídricos. O SWAT subdivide a bacia em sub-bacias e em Unidades de Resposta Hidrológica

(HRUs), que agrupam áreas com combinações semelhantes de solo, uso da terra e declividade. O modelo calcula o balanço hídrico em cada unidade e propaga os fluxos ao longo da rede de drenagem, permitindo estimar vazões em pontos específicos do sistema fluvial. Sua aplicação consolidou-se em diferentes contextos geográficos, especialmente para avaliação de cenários de mudança de uso do solo e variabilidade climática (Neitsch, 2011).

Entretanto, é importante considerar que o SWAT foi originalmente desenvolvido com base em condições ambientais dos Estados Unidos. Logo, as diferenças climáticas, pedológicas e de manejo agrícola entre regiões temperadas e subtropicais podem influenciar a adequação de seus parâmetros e a representação de processos hidrológicos em contextos brasileiros (Costa *et al*, 2024). Essa condição ressalta a importância da calibração e da análise crítica dos resultados obtidos, bem como a necessidade de avaliar a sensibilidade das simulações às escolhas metodológicas adotadas.

Nesse cenário, iniciativas nacionais têm buscado desenvolver ferramentas mais alinhadas às condições ambientais do Brasil. Modelos como o Brazilian Ecohydrological Simulation Tool (BEST), amparado pela interface do Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco (SUPer), representam esforços voltados à adaptação da modelagem hidrológica às especificidades climáticas e fisiográficas do território brasileiro. Neste sentido, o BEST busca integrar dados espaciais compatíveis com a realidade nacional e oferecer ambiente interativo de simulação, ampliando o acesso à modelagem e favorece análises comparativas entre diferentes abordagens (Bressiani *et al.*, 2023).

Apesar dos avanços, vale ressaltar que a incerteza na modelagem hidrológica não decorre apenas de erros observacionais ou da ausência de calibração, mas também das decisões metodológicas relacionadas à escolha dos dados e à forma como os processos são representados.

Dessa forma, torna-se necessário analisar conjuntamente como diferentes fontes de precipitação e diferentes estruturas de modelagem influenciam a magnitude, a distribuição e o comportamento temporal das vazões simuladas. Essa abordagem integrada permite compreender de maneira mais abrangente as incertezas associadas à modelagem hidrológica e contribui para o fortalecimento do suporte técnico à gestão de recursos hídricos em bacias brasileiras.

5. Capítulos

5.1. Capítulo 1 - Produtos de Precipitação na América do Sul: Revisão Sistemática das Aplicações, Limitações e Avanços Recentes

5.1.1. Introdução

As mudanças climáticas têm provocado alterações significativas nos padrões atmosféricos globais, refletindo diretamente no ciclo hidrológico e na dinâmica dos ecossistemas naturais. Estudos recentes indicam que o aumento da temperatura média do planeta tem contribuído para a intensificação do ciclo da água, modificando a frequência, a intensidade e a duração dos eventos de precipitação em diversas regiões do mundo (Ipcc, 2022; Paez, 2023; Zhang *et al.*, 2024).

Essas mudanças não se limitam apenas ao aumento de eventos extremos, mas também incluem alterações na sazonalidade das chuvas, deslocamento de zonas de convergência e maior irregularidade temporal, fatores que impactam diretamente a disponibilidade hídrica e o equilíbrio dos sistemas naturais e socioeconômicos (Sapucci *et al.*, 2023; Martínez-Castro *et al.*, 2025). Nesse contexto, observa-se uma crescente preocupação científica e institucional com a compreensão dos mecanismos que controlam a variabilidade da precipitação, especialmente em regiões vulneráveis, como a América do Sul (Batista *et al.*, 2024; Vargas *et al.*, 2024).

A precipitação exerce papel central em diversos processos ambientais e atividades humanas, influenciando desde a dinâmica hidrológica das bacias hidrográficas até a produção agrícola, a segurança alimentar e energética e a gestão de desastres ambientais (Torres-Mercado *et al.*, 2021; Fonseca *et al.*, 2022). Alterações nos regimes pluviométricos podem resultar em secas prolongadas, cheias repentinas e mudanças na recarga de aquíferos, afetando diretamente o planejamento territorial e o desenvolvimento sustentável (Xia *et al.*, 2020; Fushimi *et al.*, 2024).

Dessa forma, a qualidade e a confiabilidade dos dados de precipitação tornam-se fundamentais para subsidiar projetos de engenharia, planejamento urbano e agrícola, políticas públicas de adaptação climática e estratégias de mitigação de riscos (Zhao *et al.*, 2024). Contudo, devido à elevada variabilidade espacial e temporal da chuva, especialmente em regiões tropicais e subtropicais, torna-se necessária a

existência de redes de monitoramento densas, contínuas e bem distribuídas, capazes de representar adequadamente os diferentes regimes climáticos (Araújo *et al.*, 2022).

Os dados de precipitação podem ser obtidos por diferentes fontes, incluindo medições observacionais em superfície por meio de estações pluviométricas e meteorológicas, estimativas derivadas de radares meteorológicos, produtos baseados em sensoriamento remoto via satélite e conjuntos de dados provenientes de reanálises atmosféricas (Paredes-Trejo *et al.*, 2017; Raserá *et al.* 2023). Cada uma dessas abordagens apresenta vantagens e limitações relacionadas à resolução espacial, frequência temporal, cobertura geográfica e acurácia das estimativas (Santos; Andrade Filho; França, 2023).

As medições em superfície são consideradas referência por representarem observações diretas, porém frequentemente apresentam falhas, lacunas temporais e baixa densidade em áreas remotas (Ortega *et al.*, 2023). Os radares meteorológicos oferecem alta resolução espacial e temporal, mas possuem cobertura limitada e podem sofrer interferências topográficas. Já os produtos de satélite destacam-se pela ampla cobertura espacial e pela disponibilidade contínua de dados, sendo especialmente úteis em regiões com escassez de estações. No entanto, esses produtos podem apresentar incertezas associadas a algoritmos de estimativa e dificuldades na detecção de determinados tipos de precipitação, o que reforça a necessidade de validação cruzada com dados observacionais (Cassalho *et al.*, 2020).

Nesse cenário, as redes de monitoramento meteorológico e pluviométrico desempenham papel fundamental, pois fornecem dados essenciais para calibração, validação e desenvolvimento de novos produtos de precipitação (Costa *et al.*, 2019; Araújo *et al.*, 2022). Dados de reanálise, como o ERA5 e ERA-Interim do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF – DEE *et al.*, 2011), também têm ganhado destaque por integrarem observações históricas e modelagem numérica, oferecendo séries temporais consistentes e espacialmente contínuas (Fischer Filho; Fuzzo, 2022).

Na América do Sul, a elevada heterogeneidade climática, associada à influência da Cordilheira dos Andes, da Zona de Convergência Intertropical, da Monção Sul-Americana e de sistemas frontais extratropicais, resulta em padrões pluviométricos complexos e altamente variáveis no espaço e no tempo (Valencia *et al.*, 2017; Daneshvar & Freund, 2021). Essa diversidade climática, aliada à escassez de estações observacionais em áreas remotas como a Amazônia e regiões

montanhosas, torna os produtos de satélite e reanálise ferramentas estratégicas para o monitoramento climático e a tomada de decisão (Ocampo-Marulanda *et al.*, 2022).

Nos últimos anos, esses produtos têm sido amplamente aplicados não apenas em estudos climatológicos, mas também em planejamento agrícola, avaliação de riscos hidrológicos, segurança hídrica e gestão de eventos extremos, evidenciando sua relevância científica e operacional (Bressiani *et al.*, 2015a ; Paredes-Trejo; Barbosa; Kumar, 2017).

Além disso, destaca-se que cada fonte de dados pluviométricos responde de forma distinta aos diferentes regimes atmosféricos e às características físicas das regiões analisadas. Embora as estações de superfície sejam consideradas referência por fornecerem medições diretas, sua capacidade de representar a variabilidade espacial da precipitação pode ser limitada em áreas extensas ou de difícil acesso (Costa *et al.*, 2024).

Em regiões tropicais, onde a chuva convectiva apresenta grande heterogeneidade espacial, a baixa densidade de estações pode introduzir incertezas relevantes nas análises climáticas e hidrológicas. Da mesma forma, os radares meteorológicos, apesar de sua elevada resolução temporal e espacial, estão sujeitos a limitações associadas à atenuação do sinal, bloqueios orográficos e necessidade constante de calibração, fatores que podem comprometer a estimativa precisa da intensidade da precipitação (Santos; Andrade Filho; França, 2023).

Nesse sentido, a integração de múltiplas fontes de dados tem sido cada vez mais utilizada como estratégia para reduzir incertezas e aprimorar a representação espacial das chuvas, como o MERGE (Rozante *et al.*, 2010). Produtos híbridos que combinam informações provenientes de satélites, estações pluviométricas e modelos atmosféricos têm demonstrado potencial para melhorar a consistência das estimativas, sobretudo em regiões com escassez observacional (Zachow *et al.*, 2023).

Essa abordagem permite explorar as vantagens específicas de cada tipo de dado, contribuindo para análises mais robustas da variabilidade climática e para aplicações em modelagem hidrológica. Entretanto, a confiabilidade desses produtos está diretamente relacionada à qualidade das bases de dados utilizadas em sua calibração, evidenciando a necessidade de investimentos contínuos na manutenção e expansão das redes de monitoramento meteorológico (Reis, Fernandes, Ramos, 2020; Domingues *et al.*, 2024).

Além disso, a crescente demanda por informações pluviométricas em alta resolução espacial e temporal tem impulsionado o desenvolvimento de novas metodologias baseadas em técnicas avançadas de processamento de dados, como aprendizado de máquina e assimilação numérica (Garnier *et al.*, 2024). Esses avanços têm possibilitado melhorias nos algoritmos de estimativa de precipitação e na representação de eventos extremos, contribuindo para análises mais detalhadas dos regimes climáticos. Ainda assim, a validação sistemática com dados observacionais permanece fundamental para assegurar a confiabilidade das séries utilizadas em estudos hidrológicos e climáticos (Blanco *et al.* 2023).

Dessa forma, a integração entre redes tradicionais de monitoramento, produtos de satélite e reanálises atmosféricas configura-se como uma estratégia essencial para aprimorar o entendimento dos padrões de precipitação e apoiar a gestão sustentável dos recursos hídricos na América do Sul (Pereira, 2022).

Logo, a obtenção de dados de precipitação em alta resolução espacial e temporal é especialmente importante para aplicações em modelagem hidrológica. Modelos distribuídos, como o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) que é amplamente utilizado ao redor do mundo e no Brasil (Arnold *et al.*, 2012; Bressiani *et al.*, 2015b), dependem diretamente da qualidade das séries pluviométricas, uma vez que a precipitação influencia processos como geração de escoamento superficial, infiltração, transporte de sedimentos e dinâmica de nutrientes nas bacias hidrográficas (GALVÁN *et al.*, 2014; ZEIGER; HUBBART, 2017; JIANG *et al.*, 2024).

Devido à sua capacidade de integrar diferentes variáveis ambientais e cenários climáticos, o SWAT tem sido amplamente utilizado em estudos voltados à avaliação de impactos das mudanças climáticas, gestão de recursos hídricos e sustentabilidade agrícola (Bressiani *et al.*, 2015a, b; Zhang *et al.*, 2022). Nesse contexto, a escolha adequada do produto de precipitação torna-se etapa crucial, podendo influenciar significativamente os resultados das simulações hidrológicas e a interpretação dos processos físicos representados.

Diante desse panorama, compreender e monitorar a dinâmica da precipitação na América do Sul é essencial não apenas para a conservação ambiental, mas também para o desenvolvimento econômico e o bem-estar social das populações. Assim, o presente trabalho tem como objetivo principal revisar a literatura científica acerca dos diferentes dados de precipitação disponíveis para a região, discutindo suas potencialidades e limitações. Especificamente, busca-se: (1) caracterizar o clima da

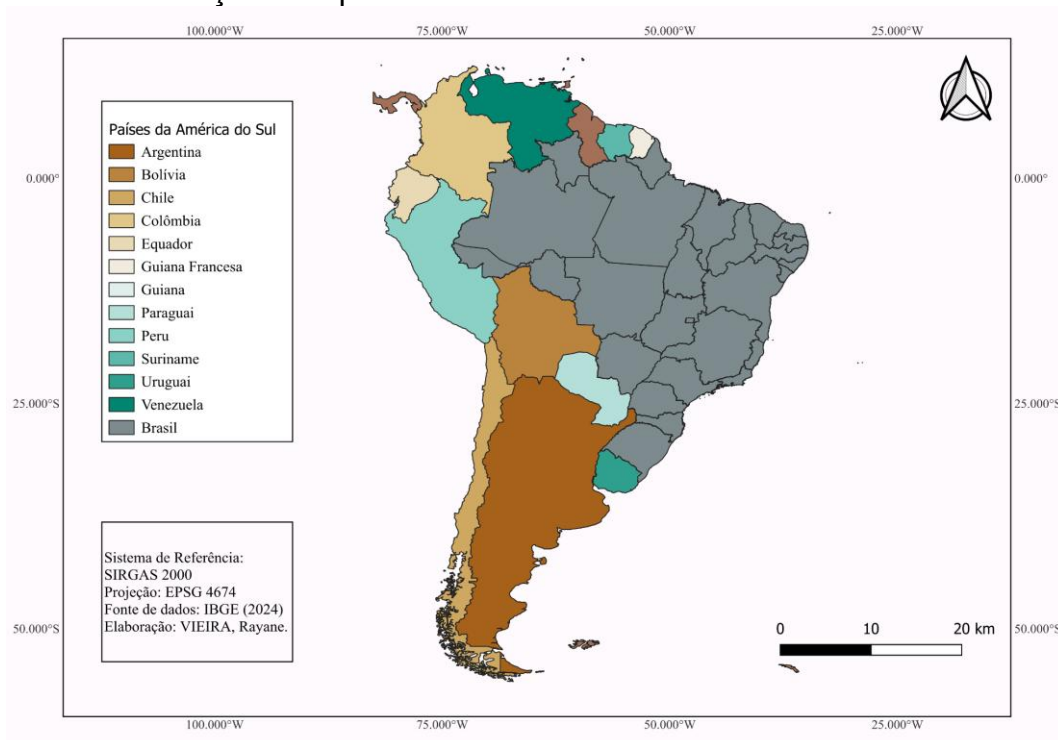
América do Sul com ênfase nos regimes de precipitação; (2) apresentar uma visão geral da produção científica da última década em relação aos dados de precipitação na América do Sul; (3) descrever os principais produtos utilizados de precipitação utilizados; (4) analisar as limitações e incertezas relatadas; (5) explorar suas aplicações, especialmente para a modelagem hidrológica; e (6) discutir tendências recentes identificadas na literatura.

5.1.2. Metodologia

5.1.2.1. Área de Estudo

A precipitação na América do Sul apresenta elevada variabilidade espacial e temporal, resultado da interação entre fatores atmosféricos de grande escala, características topográficas e influências oceânicas. A América do Sul (Figura 1) abriga desde regiões extremamente úmidas, como a Amazônia, até áreas áridas e semiáridas, como o Deserto do Atacama (Chile) e partes do Nordeste brasileiro, evidenciando a diversidade climática que caracteriza a região (Santos *et al.*, 2023; Batista *et al.*, 2024).

Figura 1 - Localização dos países da América do Sul



Fonte: Autora (2026)

Na região equatorial, especialmente na Amazônia, predominam elevados volumes de precipitação ao longo do ano, com totais anuais frequentemente superiores a 2.000 mm. A convecção intensa e a disponibilidade de umidade associada à evapotranspiração da floresta contribuem para a formação de chuvas frequentes e bem distribuídas (Martínez Castro *et al.*, 2025).

Contudo, a ocorrência de eventos extremos, como secas severas e cheias intensas, tem sido relacionada à variabilidade climática e às mudanças no uso da terra (Brêda *et al.*, 2022; Back *et al.*, 2023). Já nas áreas tropicais do Brasil Central e da Bolívia, o regime pluviométrico é fortemente sazonal, com estação chuvosa concentrada entre primavera e verão e estação seca bem definida no inverno austral, característica típica do sistema de monção sul-americano (Ureña & Saavedra, 2020).

Na faixa andina, a precipitação é fortemente modulada pela altitude e pela orientação das cadeias montanhosas, que atuam como barreira orográfica ao transporte de umidade proveniente da Amazônia e do Oceano Pacífico (Torres-Mercado *et al.*, 2025).

Regiões do Altiplano e do oeste do Peru e Chile apresentam baixos índices pluviométricos, enquanto encostas voltadas para a Amazônia registram volumes elevados, devido ao levantamento orográfico do ar úmido (Fababa, Montes, 2021; Risco *et al.*, 2025). No sul do continente, abrangendo partes do Chile, Argentina e Uruguai, predominam sistemas frontais associados às latitudes médias, responsáveis por chuvas mais regulares ao longo do ano, embora com maior frequência no inverno (Benítez *et al.*, 2025).

Além dos controles atmosféricos e topográficos, a precipitação sul-americana também é influenciada por padrões de variabilidade climática global. Eventos de El Niño, por exemplo, tendem a aumentar as chuvas no sul do Brasil, norte da Argentina e Uruguai, enquanto podem provocar condições mais secas na Amazônia e no Nordeste brasileiro (Tedeschi & Collins, 2016).

Já episódios de La Niña frequentemente resultam em padrões opostos, reforçando a complexidade da dinâmica hidroclimática regional. Nos últimos anos, estudos têm indicado alterações nos regimes de precipitação associadas às mudanças climáticas, com aumento na frequência de eventos extremos, intensificação de chuvas intensas em algumas áreas e prolongamento de períodos secos em outras (Sousa *et al.*, 2025).

Diante desse cenário, o monitoramento da precipitação na América do Sul tem se tornado cada vez mais dependente da integração entre dados observacionais de superfície, estimativas por satélite e produtos de reanálise climática. Essa combinação permite ampliar a cobertura espacial e reduzir lacunas de dados em regiões remotas, sendo fundamental para aplicações em modelagem hidrológica, planejamento agrícola, gestão de recursos hídricos e avaliação de riscos ambientais (Rusezzene *et al.*, 2021; Truta Neto *et al.*, 2023).

Assim, compreender a dinâmica da precipitação no continente é essencial para apoiar estratégias de adaptação às mudanças climáticas e fortalecer a segurança hídrica em uma região marcada por contrastes climáticos e elevada vulnerabilidade socioambiental. Nesse contexto, o Quadro 1 apresenta uma síntese das principais instituições nacionais responsáveis pela coleta, monitoramento e disponibilização de dados de precipitação na América do Sul.

Quadro 1 - Fontes institucionais de dados meteorológicos e hidrológicos na América do Sul

País/Região	Instituição(ões) responsável(is)	Atuação
Brasil	Instituto Nacional de Meteorologia (INMET); Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA); Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN); Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE)	Monitoramento meteorológico, hidrológico, previsão do tempo e alertas de desastres
Argentina	Servicio Meteorológico Nacional (SMN); Instituto Nacional del Agua (INA)	Dados meteorológicos e hidrológicos
Chile	Dirección Meteorológica de Chile (DMC); Dirección General de Aguas (DGA)	Monitoramento meteorológico e gestão de recursos hídricos
Peru	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI)	Monitoramento meteorológico e hidrológico
Bolívia	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI)	Monitoramento meteorológico e hidrológico
Colômbia	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)	Monitoramento hidrometeorológico e estudos ambientais
Equador	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI)	Rede observacional meteorológica e hidrológica

Paraguai	Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH) – Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC)	Meteorologia e hidrologia
Uruguai	Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET)	Monitoramento meteorológico nacional
Venezuela	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH)	Meteorologia e hidrologia
Guiana	Serviço Hidrometeorológico Nacional da Guiana	Registros hidrometeorológicos
Suriname	Serviço Hidrometeorológico Nacional do Suriname	Registros hidrometeorológicos
Guiana Francesa	Météo-France	Monitoramento meteorológico

5.1.2.2. Procedimentos Metodológicos para Revisão e Análise Bibliométrica dos Produtos de Precipitação

A metodologia deste estudo foi concebida a partir da combinação da revisão bibliográfica sistemática, da análise bibliométrica e aplicação adaptada do método ProKnow-C (Knowledge Development Process – Constructivist) proposto por Ensslin *et al.* (2010), permitindo uma análise estruturada e aprofundada da produção científica relacionada aos produtos de precipitação na América do Sul.

Essa integração metodológica buscou não apenas levantar o estado da arte, mas também identificar lacunas de conhecimento, tendências emergentes e padrões de aplicação desses produtos em áreas estratégicas, como climatologia, hidrologia, agricultura, gestão de riscos e adaptação às mudanças climáticas, considerando ainda as limitações observacionais que caracterizam grande parte do continente.

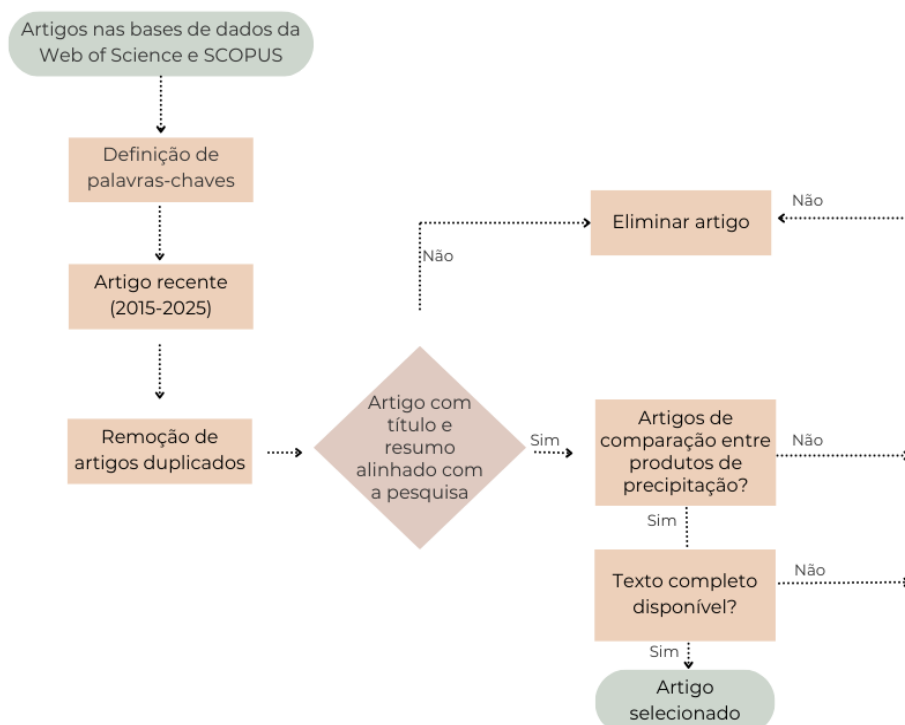
A busca bibliográfica foi conduzida em duas bases de dados bibliográficos internacionais amplamente reconhecidas pela comunidade científica, a Web of Science e a Scopus, selecionadas devido à abrangência multidisciplinar, à qualidade dos periódicos indexados e à confiabilidade dos critérios de seleção adotados por essas plataformas. A estratégia de busca foi cuidadosamente elaborada com o uso de descritores específicos e operadores booleanos, de forma a ampliar o alcance dos resultados sem comprometer a relevância temática dos estudos encontrados. Para essa revisão trabalhou-se somente com a literatura publicada em artigos científicos internacionais publicados em inglês.

Foram utilizadas os seguintes termos: "precipitation products"; "rainfall estimation"; "precipitation data"; "precipitation modeling"; ("South America" OR "Argentina" OR "Bolivia" OR "Brazil" OR "Chile" OR "Colombia" OR "Ecuador" OR "Guyana" OR "Paraguay" OR "Peru" OR "Suriname" OR "Uruguay" OR "Venezuela" OR "French Guiana"). Essa formulação permitiu contemplar diferentes terminologias adotadas na literatura internacional para descrever produtos de precipitação, ao mesmo tempo em que delimitou geograficamente o escopo ao contexto sul-americano, assegurando maior aderência aos objetivos do estudo.

O recorte temporal compreendeu o período de 2015 a agosto de 2025, definido a partir de uma análise preliminar que indicou maior concentração de publicações relevantes nesse intervalo, refletindo o crescimento recente do uso de dados satelitais, reanálises climáticas e técnicas avançadas de modelagem hidrológica. A delimitação temporal também buscou garantir um panorama atualizado das tendências científicas, considerando o avanço tecnológico dos produtos de precipitação e o aumento do interesse acadêmico em temas relacionados às mudanças climáticas e à variabilidade hidrológica na América do Sul. Além disso, o período selecionado permitiu captar a evolução metodológica dos estudos, desde análises comparativas iniciais até aplicações mais complexas envolvendo inteligência artificial e integração de múltiplas fontes de dados.

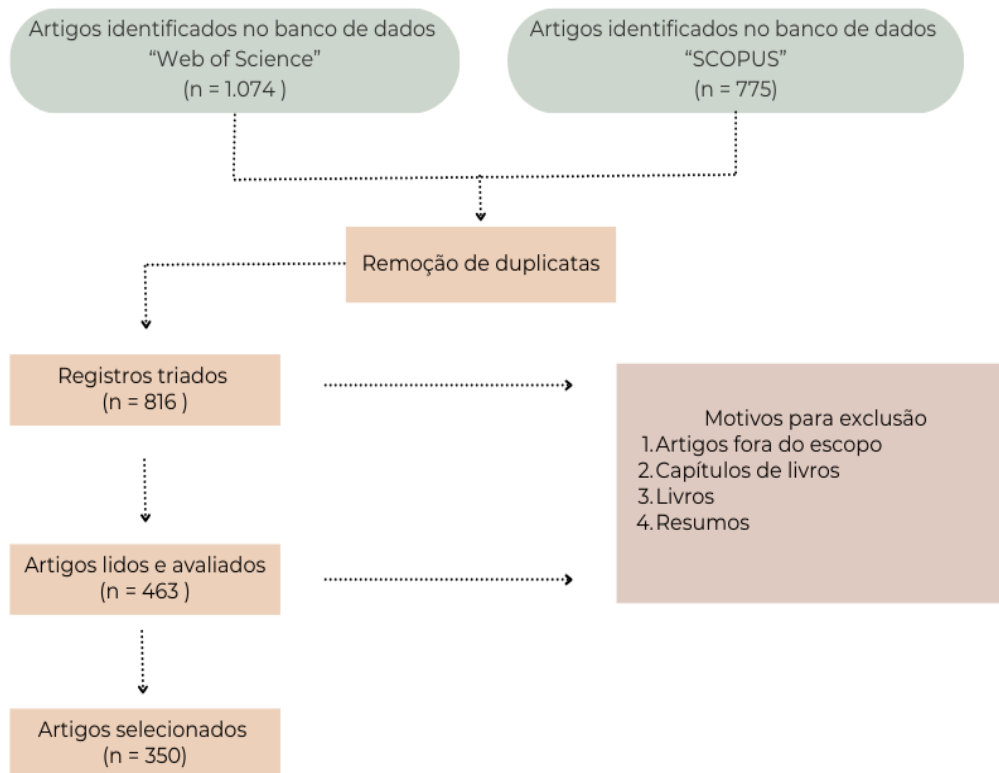
Os resultados obtidos nas bases de dados foram exportados para planilhas eletrônicas, possibilitando a organização sistemática das informações essenciais de cada publicação, incluindo título, autores, ano de publicação, periódico, país de origem, objetivos, metodologia empregada e produtos de precipitação analisados. Em seguida, realizou-se uma triagem manual criteriosa, baseada na leitura de títulos e resumos, com o objetivo de eliminar duplicidades e excluir estudos que não atendessem aos critérios estabelecidos. Estas etapas estão sintetizadas nos fluxogramas metodológicos apresentados nas Figuras 2 e 3.

Figura 2 - Fluxograma de identificação e seleção dos artigos



Fonte: Autora (2026)

Figura 3 - Fluxograma das etapas de identificação, triagem e seleção dos artigos utilizados na revisão sistemática do objeto de estudo (n = número de artigos)



Fonte: Autora (2026)

Foram incluídos apenas artigos originais e revisões sistemáticas publicados em periódicos revisados por pares, priorizando pesquisas que apresentassem aplicações práticas, avaliações comparativas ou validações de produtos de precipitação em contextos hidrológicos e climáticos relevantes. Trabalhos apresentados em eventos científicos, capítulos de livros, livros completos e estudos sem relação direta com o escopo proposto foram excluídos, garantindo maior consistência e qualidade ao portfólio bibliográfico final.

Após a etapa de seleção, foi realizada a análise bibliométrica por meio do pacote *Bibliometrix* (Aria; Cuccurullo, 2017), implementado no software R, com suporte da interface gráfica *Biblioshiny* (Aria; Cuccurullo, 2017). Essa análise permitiu explorar quantitativamente a evolução temporal das publicações, identificar autores e instituições mais produtivos no tópico, mapear redes de colaboração científica e reconhecer os periódicos de maior impacto na área. Além disso, possibilitou a categorização temática dos estudos, evidenciando as principais áreas de aplicação dos produtos de precipitação e demonstrando como essas ferramentas têm contribuído para o avanço da pesquisa científica e para o desenvolvimento de soluções voltadas à gestão de recursos hídricos e de desastres ambientais. A abordagem bibliométrica também auxiliou na identificação de tendências emergentes.

De forma complementar, aplicou-se a primeira etapa do método ProKnow-C, adaptada ao contexto da análise de produtos de precipitação na América do Sul. Essa etapa foi fundamental para garantir a construção de um portfólio bibliográfico consistente e qualitativamente relevante, indo além da simples quantificação de publicações. Foram avaliados critérios como relevância científica, alinhamento com o tema central, robustez metodológica das pesquisas, tipos de produtos de precipitação utilizados e aplicabilidade dos resultados em cenários reais. Esse processo permitiu compreender de forma mais aprofundada como diferentes conjuntos de dados têm sido empregados em estudos regionais, especialmente em aplicações relacionadas à modelagem hidrológica, ao monitoramento climático, ao planejamento agrícola e à gestão de riscos hidrometeorológicos.

A organização sistemática das informações em planilhas também possibilitou a leitura integral dos artigos selecionados, favorecendo uma análise crítica mais aprofundada. A aplicação do *ProKnow-C* contribuiu para identificar padrões recorrentes na literatura, como os produtos de precipitação mais utilizados, suas vantagens e limitações em diferentes regimes climáticos e sua adequação em regiões

com escassez de dados observacionais. Essa etapa foi particularmente importante para compreender o papel estratégico dos produtos satelitais e de reanálise em países sul-americanos, onde a densidade de estações pluviométricas ainda é limitada e a variabilidade espacial da precipitação representa um desafio significativo para estudos hidrológicos.

Adicionalmente, buscou-se garantir a rastreabilidade das decisões metodológicas ao longo de todo o processo, documentando critérios de inclusão e exclusão, etapas de triagem e procedimentos analíticos adotados. Essa preocupação metodológica contribui para a reprodutibilidade do estudo e para a transparência científica, permitindo que futuras pesquisas possam replicar ou ampliar a abordagem proposta. A combinação entre métodos quantitativos e qualitativos também possibilitou uma visão mais abrangente do estado da arte, integrando análises estatísticas da produção científica com avaliações críticas do conteúdo dos estudos selecionados (Ortega *et al.*, 2023; Anzolin *et al.*, 2024).

Ao integrar a revisão bibliográfica sistemática, a análise bibliométrica e a aplicação do método ProKnow-C, a metodologia adotada neste trabalho configurou uma abordagem abrangente. Essa combinação permitiu não apenas organizar o conhecimento existente sobre produtos de precipitação na América do Sul, mas também identificar tendências, lacunas e desafios futuros, destacando o papel estratégico desses dados para o avanço da pesquisa científica e para o enfrentamento de questões socioambientais complexas. Dessa forma, o método empregado forneceu uma base sólida e coerente para as análises e discussões subsequentes, assegurando consistência metodológica e relevância científica ao estudo.

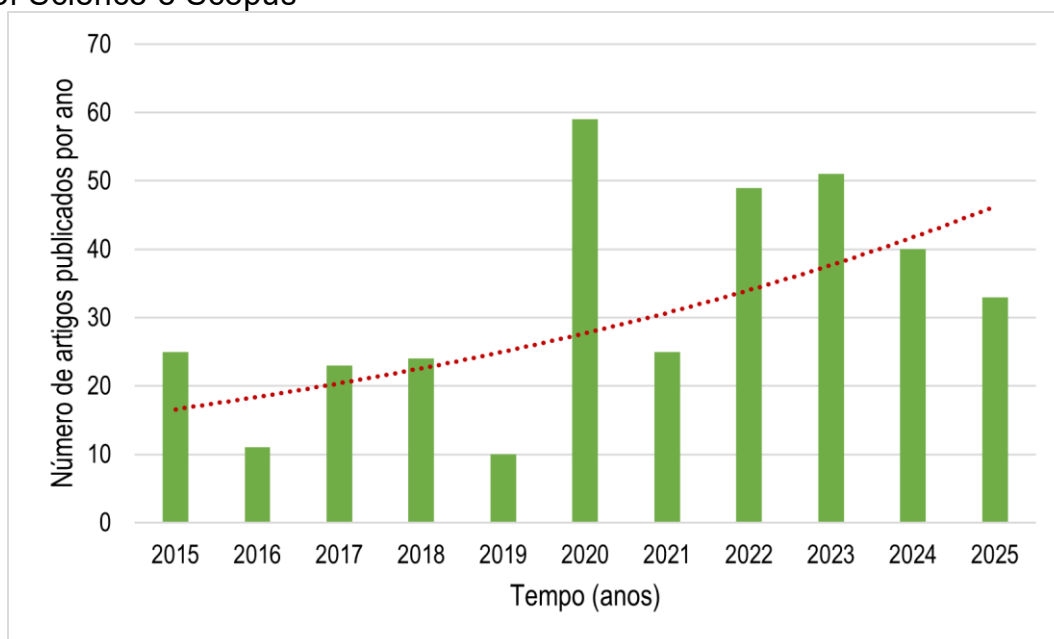
5.1.3. Resultados e discussão

5.1.3.1. Panorama da produção científica sobre produtos de precipitação na América do Sul (2015–2025)

A análise temporal das publicações nas bases Web of Science e Scopus revela um padrão consistente de crescimento do interesse científico em produtos de precipitação aplicados à América do Sul ao longo da última década (Figura 4). Em ambas as bases, observa-se um aumento gradual das publicações a partir de 2017–2018, seguido por um pico em 2020, indicando um momento de maior intensificação das pesquisas voltadas à avaliação de redes de satélites e à aplicação desses

produtos em estudos hidrológicos e climáticos. Esse comportamento sugere não apenas o avanço tecnológico na disponibilidade de dados, mas também uma ampliação das demandas científicas relacionadas à compreensão da variabilidade climática e dos eventos extremos (Tedeschi; Collins, 2016; Araújo *et al.*, 2022; Santos; Andrade Filho; França, 2023).

Figura 4 - Evolução temporal das publicações científicas sobre produtos de precipitação na América do Sul no período de 2015 a 2025 nas bases de dados Web of Science e Scopus



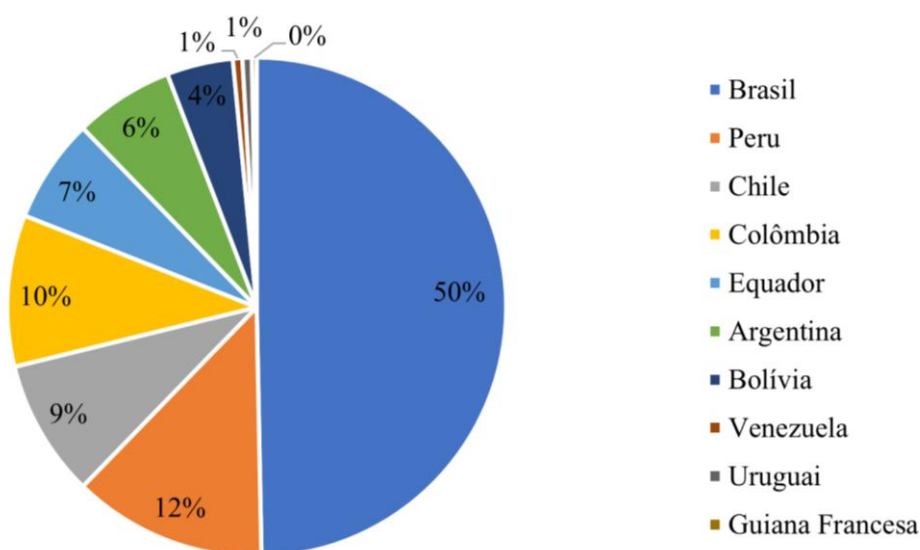
Embora as duas bases de dados bibliográficos (Web of Science e Scopus) apresentem tendências semelhantes, algumas diferenças podem ser observadas. Na Web of Science, a produção científica após 2020 mostra relativa estabilidade, sugerindo uma fase de consolidação do tema, em que os estudos passam a aprofundar análises comparativas e aplicações específicas. Já na base Scopus, a manutenção de elevados números de publicações entre 2022 e 2024 indica uma expansão contínua da literatura, possivelmente associada à inclusão de um maior número de periódicos e à crescente adoção de produtos de nova geração, como o IMERG (Huffman *et al.*, 2019), além do aumento de estudos focados em extremos climáticos e impactos regionais.

O comportamento observado após 2020 pode ser interpretado como reflexo da maturidade do campo, no qual a pesquisa deixa de se concentrar exclusivamente na validação de produtos e passa a explorar aplicações mais complexas, como

modelagem hidrológica, análise de tendências e avaliação de riscos climáticos. Por fim, o menor número de publicações em 2025, especialmente na Web of Science, deve ser interpretado com cautela, uma vez que esta pesquisa foi desenvolvida antes do final do ano. Em conjunto, os resultados evidenciam uma trajetória de crescimento seguida por estabilização em níveis elevados, reforçando a relevância contínua dos produtos de precipitação na agenda científica da região.

Além disso, a distribuição espacial dos estudos reforça os padrões observados na evolução temporal das publicações, evidenciando que o crescimento do interesse científico em produtos de precipitação também se reflete em uma concentração geográfica específica dentro da América do Sul (Figura 5). Os resultados indicam que o Brasil concentra aproximadamente metade dos artigos analisados (49,69%), seguido por países andinos como Peru (12%), Colômbia (10%) e Chile (9%), além de contribuições relevantes no Equador (7%) e na Argentina (6%). Essa predominância brasileira pode estar associada tanto à maior disponibilidade de redes observacionais e infraestrutura científica, quanto à elevada diversidade climática do país, que inclui regiões tropicais, semiáridas e subtropicais, favorecendo diferentes tipos de aplicações hidrológicas e climáticas, assim como à sua grande extensão territorial (~48% da área da América do Sul) e populacional (~49% da população da AS).

Figura 5 - Distribuição espacial dos estudos segundo países da América do Sul



Nos países como Peru, Colômbia, Chile e Bolívia, a frequência de estudos também se destaca, possivelmente devido à complexidade topográfica e à influência de

sistemas atmosféricos que tornam a estimativa da precipitação particularmente desafiadora. Essas regiões frequentemente demandam a utilização de múltiplos produtos de precipitação para reduzir incertezas associadas à variabilidade espacial, o que contribui para o aumento do número total de ocorrências por país. Já países como Venezuela e Uruguai apresentam menor representação na literatura, indicando possíveis lacunas científicas ou limitações relacionadas à disponibilidade de dados.

Destaca-se que o número total de artigos contabilizados por país pode exceder o total de estudos analisados, visto que diversos trabalhos abrangem mais de um país simultaneamente. Dessa forma, um mesmo artigo pode ser contabilizado em diferentes categorias geográficas, especialmente em análises continentais ou em estudos que abrangem múltiplas bacias hidrográficas. Esse padrão evidencia a natureza integrada das pesquisas recentes, nas quais a comparação entre dados e a análise multirregional têm se tornado estratégias recorrentes para compreender a dinâmica da precipitação na América do Sul.

Assim, além das análises em escala nacional, observa-se uma expressiva quantidade de pesquisas conduzidas em recortes espaciais mais amplos, destacando-se a América do Sul em escala regional ou continental (72 estudos), a Amazônia como região integrada (59 estudos) e a Região dos Andes em abordagens múltiplas (45 estudos). A elevada frequência dessas categorias evidencia uma tendência crescente de investigações que ultrapassam fronteiras políticas, buscando compreender padrões pluviométricos em sistemas climáticos interconectados. No caso da Amazônia, a relevância está associada ao seu papel na circulação atmosférica e no ciclo hidrológico continental, enquanto os Andes representam uma área crítica devido à influência orográfica e à complexidade na estimativa da precipitação.

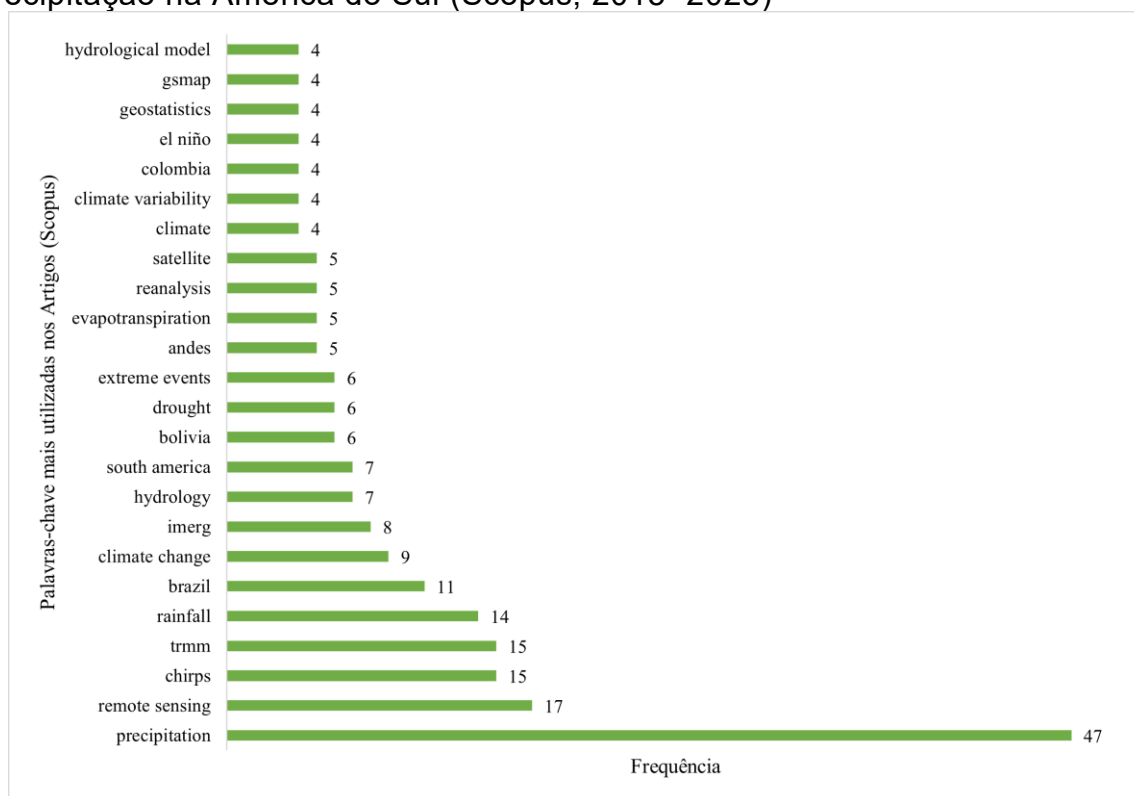
No caso da base de dados da Scopus, foi possível analisar a frequência das palavras-chave mais utilizadas nos artigos indexados sobre precipitação na América do Sul evidenciando as principais tendências e prioridades da produção científica. O termo “precipitation”, com 47 ocorrências, confirma-se como o núcleo temático das pesquisas, acompanhado por “rainfall”, que também aparece de forma recorrente. Essa predominância reflete a centralidade do estudo da chuva, não apenas em sua quantificação, mas também em sua variabilidade temporal e espacial.

Outro ponto de destaque é a forte presença de expressões relacionadas ao sensoriamento remoto, como “remote sensing”, “CHIRPS”, “TRMM”, “IMERG” e

“GSMaP”. Esses resultados evidenciam a relevância dos produtos satelitais, que se consolidam como as principais ferramentas de monitoramento hidrológico na região, sobretudo diante da escassez de estações pluviométricas em áreas remotas. Essa tendência dialoga diretamente com os levantamentos anteriores sobre os artigos analisados, nos quais ficou claro que os produtos satelitais são amplamente utilizados para validação, modelagem e análises regionais. Um gráfico de barras pode ilustrar a frequência absoluta de cada termo, destacando visualmente a predominância dos produtos satelitais (Figura 6).

No campo das aplicações, termos como “climate change”, “extreme events”, “drought” e “El Niño” indicam que grande parte das pesquisas não se limita à descrição da precipitação em si, mas busca compreender seus impactos sobre processos hidrológicos e riscos associados à variabilidade e às mudanças climáticas. A atenção dada a secas, enchentes e à intensificação de eventos extremos revela uma preocupação crescente em conectar os dados de precipitação à segurança hídrica, ao planejamento territorial e às políticas públicas.

Figura 6 - Frequência das principais palavras-chave em estudos sobre precipitação na América do Sul (Scopus, 2015–2025)



Do ponto de vista metodológico, a presença de termos como “hydrology”, “hydrological model”, “geostatistics” e “evapotranspiration” evidencia que os estudos

vão além da caracterização básica da precipitação. Eles incorporam análises avançadas de modelagem hidrológica, calibração de séries temporais e integração com outras variáveis do ciclo hidrológico, buscando compreender a dinâmica da água em diferentes escalas e contextos.

De modo geral, a análise discursiva das palavras mais frequentes na base Scopus revela três dimensões complementares: a predominância do uso de produtos de sensoriamento remoto, a forte associação entre precipitação e mudanças climáticas e a diversidade de abordagens metodológicas e geográficas. Essa combinação confirma que a ciência voltada à precipitação na América do Sul não apenas avança em termos técnicos e metodológicos, mas também se orienta para questões práticas ligadas à gestão de recursos hídricos e à adaptação às mudanças climáticas.

5.1.3.2. Principais produtos de precipitação utilizados na literatura recente

Diversas fontes de dados estão disponíveis atualmente, incluindo medições de estações de superfície, estimativas de radares meteorológicos, e a partir de sensores de satélites e reanálises climáticas (Quadro 2). Também são utilizadas combinações ou interpolações dessas bases. Entretanto, ainda existem discrepâncias significativas entre os diferentes conjuntos de dados, tanto em termos de representatividade espacial quanto de consistência temporal (Truta Neto *et al.*, 2023).

Os pluviômetros, instalados em estações meteorológicas ou hidrológicas, continuam sendo a principal referência para quantificação direta da precipitação. Esses instrumentos oferecem elevada confiabilidade pontual, mas sua cobertura espacial é limitada, especialmente em regiões remotas ou de difícil acesso. Essa limitação pode comprometer a representatividade dos dados em bacias de grande extensão ou topografia complexa (López *et al.*, 2018; Moya *et al.*, 2024).

Quadro 2 - Síntese Comparativa dos Principais Produtos de Precipitação Utilizados em Estudos Hidrológicos

Produto	Tipo de produto	Vantagens	Limitações	Aplicações principais
TRMM / TMPA¹	Satelital (micro-ondas + infravermelho)	Série histórica consolidada; boa consistência em escala diária e mensal	Pode superestimar volumes; menor resolução em relação a produtos mais recentes	Estudos hidrológicos, validação de banco de dados, análise climatológica
CHIRPS²	Híbrido (satélite + estações)	Boa representação espaço-temporal; útil em regiões com poucas estações	Subestima extremos e meses muito chuvosos em algumas áreas	Monitoramento de secas, análises climáticas e modelagem hidrológica
IMERG (GPM)³	Satelital multissensor (constelação GPM)	Alta resolução espacial e temporal; bom desempenho em eventos convectivos	Erros em regiões montanhosas e estimativa de intensidade/duração	Modelagem hidrológica, extremos de chuva, estudos hidroclimáticos
ERA5 / ERA5-Land⁴	Reanálise climática	Consistência temporal e múltiplas variáveis meteorológicas	Suavização espacial é possível subestimação local	Estudos climáticos, balanço hídrico e integração em modelos hidrológicos
PERSIANN⁵	Satelital (com algoritmos de redes neurais)	Boa variabilidade espaço-temporal; útil em análises comparativas	Vieses dependentes da intensidade da chuva	Avaliação de extremos e estudos regionais
CMORPH⁶	Satelital (micro-ondas com propagação de nuvens)	Alta resolução temporal; bom desempenho em análises comparativas	Sensível à orografia e variabilidade regional	Estudos climáticos e validação de produtos
MSWEP⁷	Mesclado (satélite + reanálise + estações)	Integra múltiplas fontes; boa consistência espaço-temporal	Dependência de dados de entrada	Modelagem hidrológica e avaliação multi-produtos
GSMaP⁸	Satelital (micro-ondas)	Melhorias após correção e blending; boa detecção de chuva orográfica	Correlação moderada em dados brutos	Avaliações comparativas e regiões montanhosas
Produtos Mesclados⁹	Mesclado	Redução de erros sistemáticos; melhor desempenho estatístico	Complexidade metodológica	Previsão hidrológica, estudos avançados e machine learning
Estações de monitoramento em superfície (in situ)	Observacional (medições diretas)	Alta precisão local; referência para validação	Baixa cobertura espacial; falhas operacionais	Calibração, validação e análises hidrológicas locais

¹Tropical Rainfall Measuring Mission/TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis ; ²Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations; ³Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (Global Precipitation Measurement); ⁴ECMWF Reanalysis 5th Generation / ERA5-Land (Land Component of the ERA5 Reanalysis); ⁵Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks; ⁶CPC MORPHing Technique (Climate Prediction Center MORPHing Technique); ⁷Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation; ⁸Global Satellite Mapping of Precipitation; ⁹Produtos Mesclados (MERGE, ML): MERGE (merged precipitation products); ML – Machine Learning

No Brasil, a Rede Hidrometeorológica Nacional, sob responsabilidade da ANA, contava em 2020 com quase 23 mil estações, das quais 4.841 eram geridas pela própria agência e 2.717 eram pluviométricas. Apesar dessa estrutura, a cobertura espacial ainda é insuficiente e as séries temporais apresentam limitações. Entre os problemas observados destacam-se falhas de manutenção, desativação de postos, erros de medição e ausência de operadores, que resultam em inconsistências e lacunas nos dados (Bressiani *et al.*, 2015b; Coutinho *et al.*, 2018; Ruezzene *et al.*, 2021).

Os radares meteorológicos representam outra importante fonte de informação. Esses equipamentos estimam a precipitação a partir da reflexão de sinais eletromagnéticos emitidos e retornados pelas gotas de chuva, fornecendo estimativas com alta resolução espacial (1 a 5 km) e temporal (5 a 10 minutos). Por essa razão, são amplamente empregados no monitoramento quase em tempo real de eventos extremos (Santos; Andrade Filho; França, 2023). Contudo, a acurácia das estimativas de radar depende da calibração com dados de superfície e pode ser afetada por fatores como relevo, interferências de sinal e características microfísicas das nuvens (Araújo *et al.*, 2022). No Brasil, a rede é limitada a 27 radares em operação desde 2014, sob responsabilidade majoritária do CEMADEN (Inmet, 2024).

Os produtos de satélite surgem como alternativa especialmente útil em países tropicais e em desenvolvimento, onde a rede observacional é escassa. Esses produtos utilizam sensores orbitais de micro-ondas e infravermelho para estimar a precipitação, oferecendo ampla cobertura espacial. Sua resolução varia conforme o sensor e o algoritmo de processamento, podendo ser horária ou diária (Fernandez-Palomino *et al.*, 2021). Apesar das incertezas inerentes, esses produtos são amplamente aplicados na modelagem hidrológica, com destaque para o TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission – Kummerow *et al.*, 1998) e o CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations – Funk *et al.*, 2015) (Alarcon; Alcayaga; Alvarez, 2015; Araújo *et al.*, 2022). Estudos realizados no Brasil, como o de Araújo *et al.* (2022), demonstraram a aplicabilidade do TRMM em regiões com escassez de estações, como no norte do Tocantins, mostrando elevada concordância estatística com os dados observados.

Ademais, o IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM – Huffman *et al.*, 2019) são mais frequentemente empregados em modelagem hidrológica, o que pode ser atribuído à sua maior resolução temporal e capacidade de capturar eventos

convectivos. A transição observada do TRMM para o IMERG em estudos mais recentes também reflete a evolução tecnológica dos sensores e algoritmos, indicando uma tendência de substituição gradual por produtos de nova geração (Moraes; Gonçalves, 2023; Andrade *et al.*, 2024).

Os dados de reanálise constituem uma fonte adicional, baseada na assimilação de observações meteorológicas em modelos numéricos globais. Essa metodologia produz séries contínuas e espacialmente homogêneas, cobrindo períodos extensos e regiões com poucas observações de superfície. O ERA5, desenvolvido pelo ECMWF (Hersbach *et al.*, 2020), é atualmente o produto de reanálise mais utilizado, oferecendo variáveis atmosféricas e de superfície em diferentes resoluções (De Almeida *et al.*, 2018). Entretanto, sua acurácia em escala local é limitada, exigindo validação com observações diretas.

Já produtos mesclados, mostram forte presença em estudos hidrológicos, sugerindo que a integração entre satélite, reanálise e dados observacionais tem sido uma estratégia crescente para reduzir vieses e melhorar a consistência das estimativas, principalmente em áreas com monitoramento limitado (Cassalho *et al.*, 2020).

Outros produtos, como PERSIANN (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks – Sorooshian *et al.*, 2000), CMORPH (Climate Prediction Center Morphing Technique – Joyce *et al.*, 2004) e GSMaP (Global Satellite Mapping of Precipitation – Kubota *et al.*, 2007), aparecem com menor frequência relativa nas publicações analisadas, mas desempenham papel importante em estudos comparativos e avaliações multi-produto, contribuindo para identificar incertezas associadas a diferentes metodologias de estimativa. A menor representatividade desses produtos pode estar associada tanto à sua disponibilidade regional quanto à preferência da literatura por conjuntos de dados mais consolidados ou que integrem múltiplas fontes de informação.

Além disso, observa-se que estudos cujo foco principal é a avaliação e validação de dados de precipitação aparecem com menor frequência como área temática específica. Isso sugere que a validação tem sido, na maioria das vezes, incorporada como etapa metodológica dentro de pesquisas aplicadas, especialmente em trabalhos voltados à modelagem hidrológica e às análises climáticas, em vez de constituir o objetivo central das investigações.

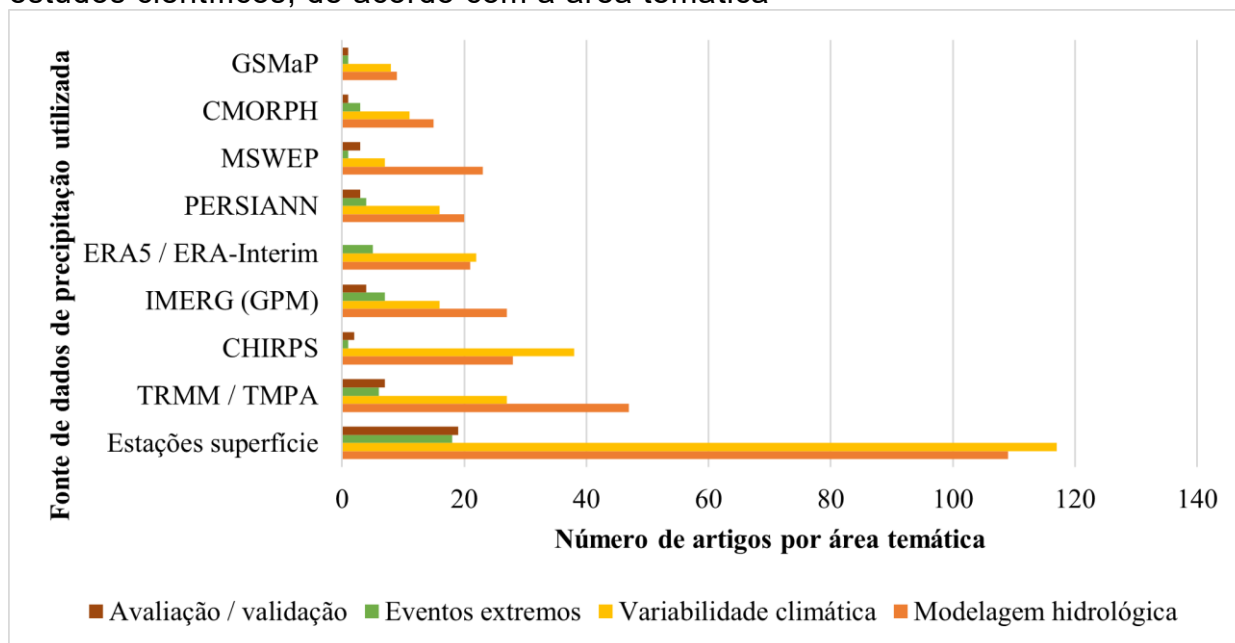
Em conjunto, esses resultados evidenciam uma evolução da literatura, na qual os produtos de precipitação deixam de ser apenas objeto de comparação e passam a atuar como ferramentas estratégicas para análises integradas de processos hidrológicos, variabilidade climática e eventos extremos na América do Sul, refletindo a maturidade científica e o avanço tecnológico na área.

Em síntese, cada fonte de informação sobre precipitação apresenta vantagens e restrições específicas. A escolha adequada depende da escala espacial e temporal do estudo, do objetivo da análise e da disponibilidade de dados observacionais para calibração e validação. A análise de séries longas é particularmente importante para detectar tendências hidrológicas e apoiar o planejamento sustentável dos recursos hídricos, sobretudo em um cenário de mudanças climáticas e aumento da variabilidade dos regimes pluviométricos (Alemu; Bawoke, 2019).

A literatura científica recente sobre produtos de precipitação na América do Sul evidencia avanços relevantes tanto no uso de estimativas satelitais e de reanálise quanto na integração dessas com dados de estações terrestres. Esses estudos têm buscado avaliar acurácia, aplicabilidade e limitações dos diferentes produtos, especialmente em regiões com baixa densidade de monitoramento, o que reforça sua importância para a modelagem hidrológica, o planejamento de recursos hídricos e a compreensão de fenômenos climáticos (De Almeida *et al.*, 2018).

Neste sentido, a análise integrada entre os principais produtos de precipitação e as áreas temáticas dos estudos, presente na Figura 7, evidencia não apenas padrões de aplicação, mas também diferenças claras no papel desempenhado por cada fonte de dado de precipitação na literatura científica da América do Sul. As estações de monitoramento em superfície (*in situ*) permanecem como a principal referência observacional, apresentando elevada frequência em todas as áreas temáticas. Esse resultado reforça que, mesmo diante da expansão dos produtos satelitais e de reanálise, os dados observados continuam sendo essenciais para calibração, validação e avaliação do desempenho dos demais produtos, sobretudo em regiões de elevada variabilidade climática e topográfica.

Figura 7 - Distribuição dos diferentes produtos de precipitação empregados nos estudos científicos, de acordo com a área temática



Entre os produtos satelitais, observa-se que o CHIRPS apresenta forte associação com estudos de variabilidade climática e análises espaço-temporais. Essa predominância pode estar relacionada ao seu caráter híbrido, que combina informações de satélite com dados de estações pluviométricas, resultando em maior consistência espacial para avaliações de tendência, monitoramento de secas e estudos climáticos regionais. Em contraste, produtos como o TRMM/TMPA e o IMERG são mais frequentemente empregados em modelagem hidrológica, o que pode ser atribuído à sua maior resolução temporal e capacidade de capturar eventos convectivos. A transição observada do TRMM para o IMERG em estudos mais recentes também reflete a evolução tecnológica dos sensores e algoritmos, indicando uma tendência de substituição gradual por produtos de nova geração.

Os dados de reanálise, com destaque para o ERA5, apresentam participação semelhante entre aplicações hidrológicas e climáticas, evidenciando sua ampla versatilidade. Por integrar múltiplas variáveis atmosféricas em séries contínuas, o ERA5 tem sido utilizado tanto em análises de balanço hídrico quanto em estudos de tendências e variabilidade regional, frequentemente atuando como complemento aos produtos satelitais. Já produtos mesclados, como o MSWEP, mostram forte presença em estudos hidrológicos, sugerindo que a integração entre satélite, reanálise e dados observacionais tem sido uma estratégia crescente para reduzir vieses e melhorar a consistência das estimativas, principalmente em áreas com monitoramento limitado.

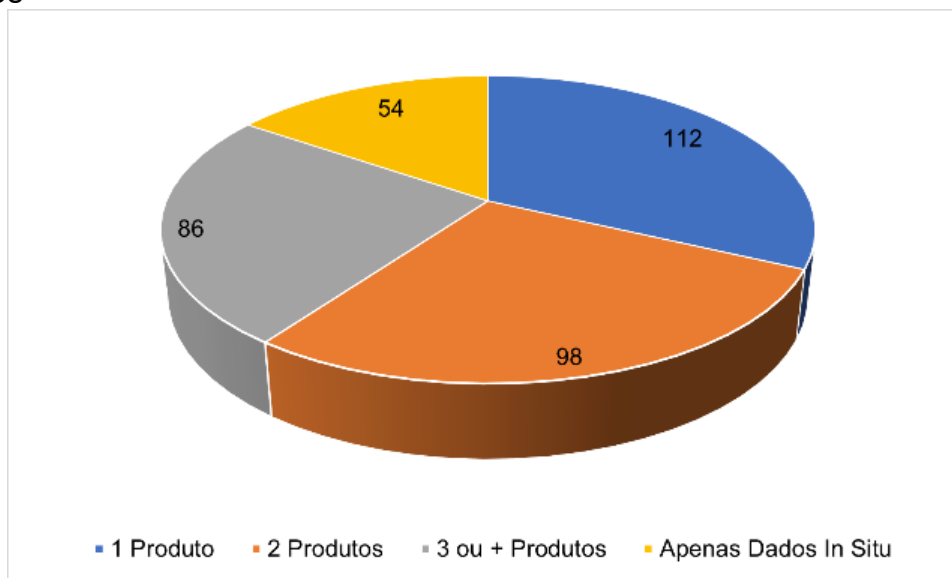
Outros produtos, como PERSIANN, CMORPH e GSMaP, aparecem com menor frequência relativa, mas desempenham papel importante em estudos comparativos e avaliações multi-produto, contribuindo para identificar incertezas associadas a diferentes metodologias de estimativa. A menor representatividade desses dados pode estar relacionada tanto à disponibilidade regional quanto à preferência da literatura por produtos mais consolidados ou com maior integração de fontes.

Adicionalmente, verifica-se que estudos cujo foco principal é a avaliação e validação de produtos de precipitação apresentam menor frequência como temática central. Esse padrão sugere que a validação tem sido, em muitos casos, incorporada como etapa metodológica em pesquisas aplicadas, sobretudo em investigações voltadas à modelagem hidrológica e às análises climáticas.

De forma integrada, esses resultados indicam uma evolução da literatura científica, na qual os produtos de precipitação deixam de ser exclusivamente objeto de comparação e passam a desempenhar papel estratégico como ferramentas de suporte à análise de processos hidrológicos, da variabilidade climática e da ocorrência de eventos extremos na América do Sul. Tal movimento reflete o amadurecimento científico do campo e os avanços tecnológicos relacionados à disponibilidade e à qualidade desses conjuntos de dados.

Por fim, ao analisar a combinação de fontes (Figura 8), observa-se que 112 artigos utilizaram apenas um produto de precipitação, refletindo a simplicidade metodológica de muitos estudos, especialmente os voltados a análises exploratórias ou regionais. Em contrapartida, 98 artigos adotaram dois produtos, em geral combinando satélites (TRMM + GPM ou TRMM + CHIRPS) ou satélite e reanálise, visando aumentar a robustez dos resultados por meio de comparação cruzada. Por fim, 86 artigos integraram três ou mais produtos de precipitação, revelando uma tendência crescente em estudos complexos, que buscam reduzir incertezas e melhorar a representatividade espacial e temporal das estimativas.

Figura 8 - Número de artigos segundo a quantidade de produtos de precipitação utilizados



5.1.3.3. Aplicações dos produtos de precipitação na América do Sul: tendências recentes e perspectivas futuras na literatura científica

Costa *et al.* (2019) compararam dados mensais do produto *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations* (CHIRPS) com informações de 183 estações meteorológicas do CPTEC/INPE e do INMET para o período de 1998 a 2010. Os resultados indicaram elevada concordância entre os conjuntos de dados, com coeficiente de determinação de 95,4%, alcançando valores próximos a 97% quando considerada a área total do Brasil. Apesar do bom desempenho geral, diferenças mais expressivas foram identificadas no noroeste do Amazonas e no sudoeste do Pará, sugerindo que fatores locais, como variabilidade orográfica, cobertura vegetal e limitações na densidade das estações, influenciam a acurácia das estimativas. Esses resultados reforçam que, embora produtos híbridos como o CHIRPS apresentem elevada consistência em escala regional, a validação local permanece essencial para aplicações hidrológicas.

No caso do estudo de Manz *et al* (2017), foi apresentado uma validação inicial do produto de precipitação por satélite IMERG (GPM) entre março de 2014 e agosto de 2015 na região tropical dos Andes, comparando seus resultados com o produto TMPA (TRMM) e dados de 302 pluviômetros no Equador e no Peru. As análises foram realizadas em diferentes escalas espaciais e temporais, considerando sub-regiões hidrometeorologicamente distintas. Os resultados indicam que o IMERG possui

melhor capacidade de detecção e estimativa da intensidade da chuva, especialmente nas áreas de alta montanha, além de representar melhor as distribuições de probabilidade observadas. No entanto, não houve melhora significativa na costa árida do Peru, onde persistem erros sistemáticos e aleatórios. O estudo destaca que parte das diferenças entre satélite e pluviômetros está relacionada às discrepâncias de escala espacial entre medições pontuais e estimativas por pixel, indicando a necessidade de avaliações futuras mais detalhadas dessas incertezas.

Em escala diária, Filho e Fuzzo (2022) analisaram a reanálise ERA Interim do ECMWF no norte do estado de São Paulo, utilizando dados de 2011 a 2020 processados no Google Earth Engine e comparados com observações de uma estação meteorológica em Bebedouro-SP. As estimativas de precipitação e temperatura apresentaram desempenho satisfatório, sobretudo em períodos com ausência ou falhas nas medições de superfície, evidenciando o potencial das reanálises como alternativa complementar em regiões com lacunas observacionais. De modo semelhante, Bressiani *et al.* (2015a) aplicaram o modelo SWAT na bacia do Jaguaribe, no Ceará, avaliando diferentes combinações de dados pluviométricos. A integração entre a reanálise CFSR e pluviômetros locais apresentou os melhores resultados na simulação hidrológica, destacando a importância da combinação de múltiplas fontes para reduzir incertezas e melhorar a representação dos processos hidrológicos em regiões semiáridas.

Outros estudos reforçam a relevância dos produtos satelitais em áreas com monitoramento limitado. Araújo *et al.* (2022) compararam dados da ANA com estimativas do TRMM no norte do Tocantins, utilizando séries entre 2009 e 2019. O elevado grau de dependência estatística entre os conjuntos indicou que o TRMM pode atuar como alternativa viável em regiões com baixa densidade de postos pluviométricos ou séries incompletas. Nesse contexto, Alemu e Bawoke (2019) destacam que análises de longo prazo envolvendo precipitação e vazão são fundamentais para compreender mudanças no ciclo hidrológico, permitindo avaliar impactos ambientais e subsidiar estratégias de gerenciamento de recursos naturais em cenários de variabilidade climática.

A análise conjunta de aproximadamente 350 artigos evidencia a predominância de produtos satelitais na região, com destaque para TRMM e CHIRPS em áreas com baixa cobertura observacional. Almeida *et al.* (2020) verificaram a consistência do TRMM 3B42 v7 na bacia do Rio Itapemirim (ES), demonstrando sua capacidade de

representar padrões hidrológicos regionais. Por sua vez, Ocampo-Marulanda *et al.* (2022) destacaram o desempenho do CHIRPS no sudoeste da Colômbia, onde o produto apresentou boa habilidade em capturar padrões espaço-temporais associados a eventos ENSO. Ambos os estudos reforçam a utilidade desses dados, mas apontam a necessidade de ajustes regionais e validação cruzada com dados *in situ*.

Produtos de reanálise climática, como ERA5 e MERRA-2, aparecem em menor número de estudos quando considerados isoladamente, sendo frequentemente utilizados em combinação com produtos satelitais. Esse padrão pode ser explicado, em parte, pelo fato de o ERA5 ser relativamente mais recente em relação a versões anteriores, como o ERA-Interim, o que ainda influencia sua difusão na literatura. Além disso, de forma geral, produtos de reanálise tendem a ser menos utilizados isoladamente em estudos hidrológicos devido a limitações associadas à resolução espacial de sua grade numérica. No caso do MERRA-2, desenvolvido pela NASA, sua menor presença na literatura também pode estar relacionada à menor popularidade em comparação com reanálises amplamente difundidas, como as do ECMWF e do NCEP (por exemplo, o CFSR).

Trabalhos como os de Paredes-Trejo, Barbosa e Kumar (2017) e Derin *et al.* (2016) exemplificam essa abordagem integrativa, comparando múltiplos dados — CHIRPS, TMPA, CMORPH, PERSIANN, GSMaP e ECMWF — com observações de superfície para avaliar o desempenho regional. Os resultados indicam que a integração de diferentes fontes tende a reduzir vieses e melhorar a representação espacial da precipitação, sobretudo em áreas de topografia complexa.

O monitoramento terrestre, embora menos frequente em termos de abrangência espacial, permanece estratégico para a confiabilidade das análises. Nascimento *et al.* (2021) compararam oito produtos em grade na Colômbia e observaram variações no desempenho conforme a escala temporal e a região analisada, evidenciando que não há um único produto ideal para todos os contextos climáticos. Delahaye *et al.* (2015) analisaram dados de 235 pluviômetros na Amazônia Legal e ressaltaram a importância do controle de qualidade das séries observacionais para validação de estimativas remotas. No Chile, estudos envolvendo cerca de 100 bacias hidrográficas avaliaram produtos como CR2MET, RF-MEP, ERA5 e MSWEP, demonstrando que a escolha dos dados e das técnicas de regionalização influencia

significativamente os resultados, embora processos de calibração possam reduzir discrepâncias.

Quanto à integração de múltiplas fontes, pesquisas conduzidas em regiões de elevada diversidade climática, como Andes e Amazônia, demonstram que abordagens combinadas apresentam maior robustez. Trabalhos como os de Tedeschi e Collins (2016) e Anselm *et al.* (2020) enfatizam que a utilização conjunta de produtos satelitais, reanálises e modelos climáticos (CMIP5) amplia a compreensão da variabilidade pluviométrica e contribui para análises de longo prazo relacionadas à gestão hídrica e à avaliação de riscos ambientais.

Casos específicos ilustram a diversidade de aplicações dos produtos de precipitação. Daneshvar e Freund (2021) identificaram aumento de precipitação antecedendo grandes terremotos na região Peru–Chile, sugerindo possíveis interações entre processos atmosféricos e sísmicos. Torres-Mercado *et al.* (2025) avaliaram cenários de enchentes na bacia do Rio Cunas, no Peru, indicando intensificação de picos de vazão sob cenários de mudanças climáticas. Hurtado *et al.* (2021), na Argentina subtropical, testaram diferentes métodos de interpolação para séries pluviométricas e apontaram a regressão linear múltipla como a abordagem mais eficaz para preencher lacunas em séries históricas.

Nos últimos vinte anos, a diversidade de produtos disponíveis aumentou significativamente. Além dos dados satelitais e de reanálise, produtos híbridos e mesclados, como MSWEP, GPCC e CPC, passaram a integrar múltiplas fontes para reduzir vieses sistemáticos. Beck *et al.* (2017) avaliaram 22 produtos globais e regionais, identificando aqueles com melhor desempenho em diferentes contextos climáticos. Fernandez-Palomino *et al.* (2021) desenvolveram o produto RAIN4PE para Peru e Equador, integrando satélite, reanálise e dados de superfície com correções hidrológicas baseadas em vazão, alcançando melhor desempenho em simulações de escoamento. De forma semelhante, Baltazar *et al.* (2023) demonstraram que versões corrigidas do IMERG podem melhorar significativamente a performance hidrológica em bacias andinas pouco monitoradas.

Em conjunto, esses resultados indicam que a integração de diferentes fontes de dados, aliada à validação regional, tem ampliado a confiabilidade das análises hidrológicas e climáticas. Os produtos de precipitação consolidaram-se como ferramentas essenciais para o monitoramento ambiental, o planejamento hídrico, a avaliação de eventos extremos e o desenvolvimento de políticas públicas na América

do Sul, contribuindo diretamente para a mitigação de riscos associados à variabilidade e às mudanças climáticas.

5.1.4. Conclusões

Com base na revisão sistemática de artigos científicos publicados na última década nas bases Web of Science e Scopus, conclui-se que os produtos de precipitação desempenham papel central no avanço da pesquisa climática e hidrológica na América do Sul, sendo fundamentais para o monitoramento, a modelagem e a gestão de recursos hídricos. Observou-se a predominância do uso de produtos satelitais, como TRMM, CHIRPS e IMERG, especialmente em regiões com baixa densidade de estações pluviométricas, enquanto dados de reanálise e medições em superfície atuam de forma complementar, fortalecendo as análises.

A revisão evidenciou a elevada heterogeneidade dos regimes de precipitação no continente, influenciados tanto por sistemas atmosféricos de grande escala quanto por fatores fisiográficos, como relevo e cobertura vegetal. Essa variabilidade reforça a necessidade de abordagens regionais, uma vez que diferentes áreas apresentam respostas hidrológicas distintas. Além disso, a análise da produção científica indicou crescimento expressivo das pesquisas a partir de 2017, com concentração geográfica no Brasil e lacunas relevantes em outras regiões da América do Sul.

A diversidade metodológica encontrada demonstra que nenhum produto de precipitação é universalmente adequado, sendo recorrentes limitações associadas à resolução espacial, à representação de eventos extremos e à influência da topografia. Dessa forma, a literatura destaca a importância de validações locais, integração de múltiplas fontes de dados e aplicação de técnicas de correção de vieses para aumentar a confiabilidade dos resultados.

No âmbito das aplicações, os produtos de precipitação têm papel essencial na modelagem hidrológica, com destaque para o uso do modelo SWAT. Estudos indicam que a integração entre dados satelitais, reanálises e observações em superfície constitui uma estratégia robusta para reduzir incertezas, suprir lacunas de monitoramento e melhorar a representação dos processos hidrológicos, ampliando a capacidade de simulação e apoio ao planejamento hídrico.

Por fim, as tendências recentes apontam para o avanço no uso de produtos de alta resolução, dados híbridos e abordagens baseadas na fusão de informações.

Em síntese, os produtos de precipitação consolidam-se como ferramentas estratégicas para o monitoramento ambiental e a gestão de recursos hídricos na América do Sul, sendo que avanços futuros dependem do aprimoramento dos algoritmos, da expansão das redes observacionais e da integração entre diferentes bases de dados e modelos para redução das incertezas.

5.2. Capítulo 2 - Resposta Hidrológica da Bacia do Rio Camaquã sob Diferentes Abordagens Metodológicas

5.2.1. Introdução

A modelagem hidrológica constitui uma ferramenta central para a análise do comportamento de bacias hidrográficas, permitindo integrar variáveis climáticas, características físicas do território e condições de uso e manejo do solo em representações quantitativas do ciclo da água (Baltazar *et al.*, 2023). Sua aplicação subsidia a gestão de recursos hídricos, o planejamento territorial, a avaliação de impactos ambientais e a análise de eventos extremos, como cheias e estiagens. Ao traduzir processos complexos em formulações matemáticas, os modelos hidrológicos possibilitam compreender a dinâmica dos fluxos de água em diferentes escalas temporais e espaciais (Zhang *et al.*, 2025).

Entretanto, a simulação hidrológica está sujeita a múltiplas fontes de incerteza. Além das limitações associadas aos dados de entrada, especialmente à representação espacial da precipitação, as diferenças na estrutura conceitual dos modelos exercem influência significativa sobre os resultados obtidos (Jiang *et al.*, 20254).

Mesmo quando aplicados à mesma bacia hidrográfica e alimentados com bases de dados semelhantes, modelos distintos podem produzir respostas divergentes em função da forma como representam processos como infiltração, geração de escoamento superficial, fluxo lateral e contribuição subterrânea. Essas diferenças estruturais podem afetar não apenas a magnitude das vazões simuladas, mas também sua distribuição temporal e sua sensibilidade a variações climáticas (Alawi; Özkul (2023).

Nos últimos anos, modelos semi-distribuídos têm sido amplamente empregados em estudos hidrológicos, destacando-se o SWAT/SWAT+ (Soil and Water Assessment Tool Plus). O SWAT+ representa a evolução do modelo SWAT, incorporando maior flexibilidade na discretização espacial e aprimoramentos na representação de processos hidrológicos e de qualidade da água. Sua estrutura baseia-se na subdivisão da bacia em subunidades e Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs), que agrupam áreas com combinações semelhantes de solo, uso da terra e declividade, permitindo considerar a heterogeneidade ambiental no cálculo do balanço hídrico (Costa *et al.*, 2024; Bressiani *et al.*, 2015a)

Por outro lado, sistemas como o BEST (Brazilian Ecohydrological Simulation Too) apresentam abordagens alternativas de discretização espacial e integração de dados, utilizando bases compatíveis com a realidade brasileira e oferecendo ambiente interativo para execução de simulações (Bressiani *et al.*, 2023). Embora compartilhem fundamentos comuns da modelagem hidrológica, as diferenças na organização espacial e na formulação dos processos podem resultar em padrões de resposta distintos, especialmente quando analisados sob métricas que consideram não apenas o ajuste pontual, mas também a representação estrutural do regime hidrológico (Junqueira *et al.*, 2022).

Tradicionalmente, estudos comparativos entre modelos concentram-se na avaliação de desempenho após etapas de calibração, nas quais parâmetros são ajustados para maximizar a concordância entre valores simulados e observados. Embora esse procedimento seja fundamental para aprimorar a acurácia das simulações, ele pode mascarar diferenças estruturais entre modelos ao compensar limitações conceituais por meio de ajustes paramétricos. Nesse sentido, a análise do comportamento em condição pré-calibração torna-se relevante, pois permite investigar como cada modelo responde às condições iniciais e aos dados de entrada antes da interferência de ajustes específicos.

A avaliação em condição pré-calibração possibilita identificar diferenças intrínsecas relacionadas à representação dos processos hidrológicos, evidenciando a sensibilidade estrutural do regime de vazões às escolhas metodológicas (Ferraz *et al.*, 2023). Essa abordagem contribui para compreender de forma mais transparente como cada modelo organiza e transforma as entradas climáticas em fluxos simulados, oferecendo subsídios para análises comparativas mais fundamentadas.

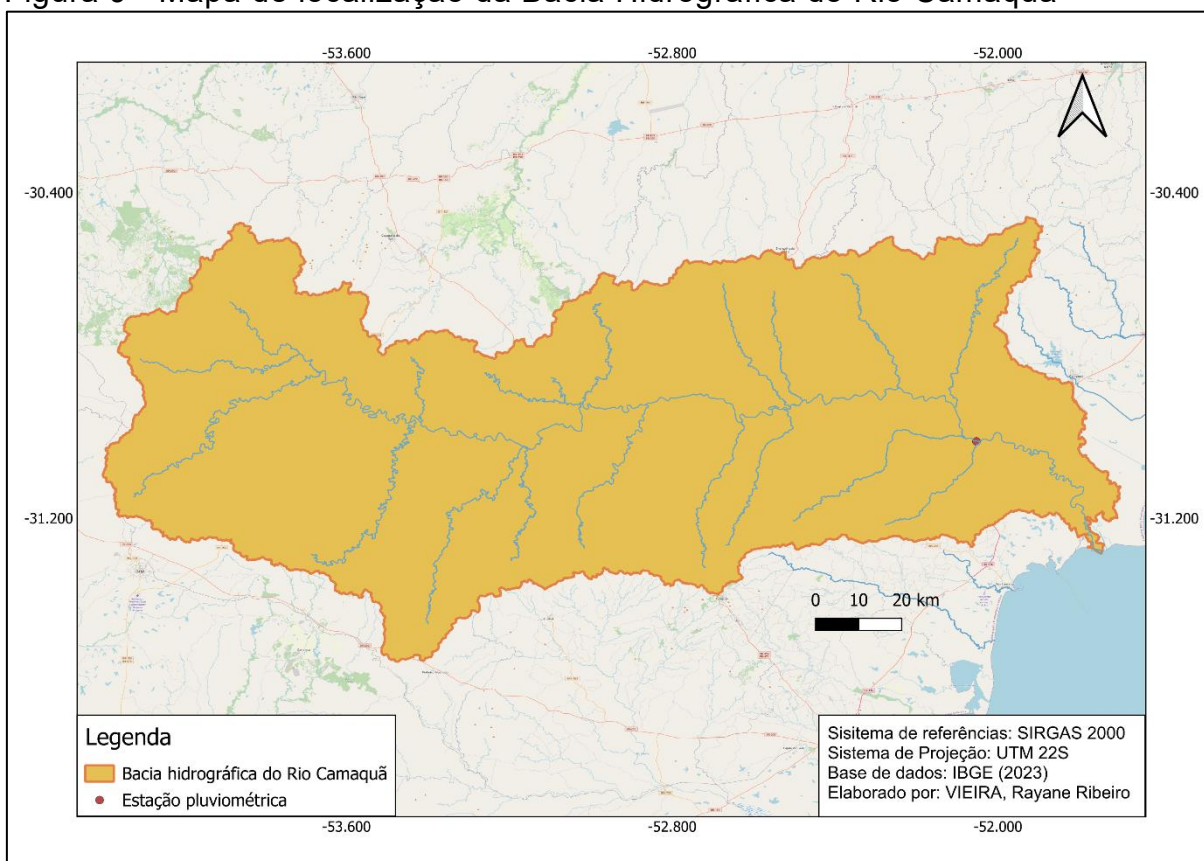
Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo comparar o comportamento hidrológico estrutural dos modelos SWAT+ e BEST aplicados à Bacia do Rio Camaquã em condição pré-calibração, avaliando sua capacidade de representar o regime mensal de vazões, a distribuição das vazões ao longo da curva de permanência e o comportamento de tendência no período de 2005 e 2020. Ao adotar métricas que exploram diferentes dimensões do regime hidrológico, busca-se compreender como as diferenças na estrutura conceitual influenciam a simulação da resposta da bacia, contribuindo para o avanço metodológico da modelagem hidrológica em contexto brasileiro.

5.2.2. Materiais e Métodos

5.2.2.1. Área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã (BHRC) (Figura 9) localiza-se na Região Hidrográfica do Litorânea, na porção central do estado do Rio Grande do Sul, sul do Brasil. Com área aproximada de 21.657 km², abrange total ou parcialmente 28 municípios e concentra população estimada em cerca de 356 mil habitantes (SEMA, 2020). O rio Camaquã percorre aproximadamente 300 km desde suas nascentes até a desembocadura na Laguna dos Patos.

Figura 9 - Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã



Fonte: Autora (2026)

Inserida no Bioma Pampa, a bacia apresenta predominância de campos naturais e relevante diversidade ecológica, além de desempenhar papel significativo na oferta de serviços ecossistêmicos. Sua morfologia é marcada por relevo irregular, altitudes variando entre 17 e 553 metros. Os solos predominantes são argissolos e neossolos, e o uso do solo é majoritariamente voltado a campos secos e atividades agropecuárias (Cardoso Junior *et al.*, 2021; Santos-Fischer *et al.*, 2016).

O clima da região é classificado como subtropical úmido, caracterizado por verões quentes, invernos frios com ocorrência frequente de geadas e significativa variabilidade sazonal de precipitação. A bacia apresenta múltiplos usos da água, incluindo abastecimento público, irrigação, dessedentação animal, atividades industriais e geração de energia, além de usos não consuntivos como pesca e navegação (Santa-Rosa; Schettini, 2024). Ao mesmo tempo, registra recorrentes eventos hidrometeorológicos extremos, com histórico equilibrado entre períodos de estiagem e episódios de inundação, evidenciando sua vulnerabilidade frente à variabilidade climática.

5.2.2.2. Base de dados

Foram avaliados dois modelos hidrológicos de abordagem semi-distribuída: o SWAT+ calibrado e o sistema BEST pré-calibrado.

O SWAT+ (Soil and Water Assessment Tool) constitui a versão atualizada do modelo SWAT, estruturado para simular o balanço hídrico em longo prazo a partir da subdivisão da bacia em subunidades e Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs). O modelo representa processos como interceptação, infiltração, evapotranspiração, geração de escoamento superficial, fluxo lateral e contribuição do fluxo de base, propagando os fluxos ao longo da rede de drenagem até o ponto de interesse.

Para fins comparativos, foram utilizados os resultados do SWAT+ previamente calibrado em estudo anterior, no qual os parâmetros foram ajustados com base em séries observadas de vazão, garantindo desempenho satisfatório segundo métricas estatísticas consolidadas (Sell, 2025).

O BEST constitui uma plataforma interativa de modelagem hidrológica desenvolvida para integrar bases de dados espaciais compatíveis com a realidade brasileira e permitir a execução de simulações em ambiente web. A ferramenta é baseada no HAWQS (Hydrologic and Water Quality System), desenvolvido nos Estados Unidos, e integra conceitos do SUPer (Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco), adotando como mecanismo de modelagem o Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Embora compartilhe fundamentos da modelagem hidrológica semi-distribuída, o BEST apresenta particularidades na organização espacial e na integração dos dados de entrada, utilizando uma base de dados global padronizada para todas as bacias hidrográficas brasileiras.

A plataforma adota uma malha inicial com resolução espacial aproximada de 10 × 10 km para a configuração do modelo, abrangendo todas as bacias do território nacional, inclusive áreas transfronteiriças. Além de oferecer uma versão integrada e padronizada em nível nacional, o sistema avança progressivamente em direção a um ambiente colaborativo e aberto, baseado em tecnologias livres, ampliando a acessibilidade e a reprodutibilidade das simulações (Bressiani *et al.*, 2023; Arnold *et al.*, 1998).

No presente estudo, o BEST foi executado em condição pré-calibração, sem a realização de ajuste paramétrico específico para a Bacia do Rio Camaquã. Foram adotados parâmetros disponíveis na configuração padrão da plataforma, bem como valores previamente definidos em estudo anterior aplicado à mesma bacia. Tal procedimento permitiu analisar o comportamento estrutural do modelo com base em uma parametrização inicial consistente, isolando a influência da formulação conceitual antes de qualquer otimização estatística direcionada.

Para o presente estudo, foram utilizados dados de vazão média mensal obtidos no sistema HidroWeb, referentes à estação fluviométrica Passo do Mendonça (código 87905000), no período de 1987 a 2020. A escolha desse período e dessa estação deve-se à maior disponibilidade e continuidade da série histórica, bem como à sua localização próxima à saída da bacia hidrográfica, permitindo melhor representação da resposta hidrológica integrada. Esses dados foram empregados como referência para avaliação do desempenho das simulações hidrológicas.

A aplicação do BEST teve início com a definição do ponto de controle e da bacia hidrográfica de interesse. Esse procedimento foi realizado a partir das coordenadas geográficas da estação fluviométrica, permitindo ao sistema delimitar automaticamente a área de drenagem a montante. A discretização espacial da bacia foi realizada por meio de quadrículas (grids), que integram informações de topografia, rede de drenagem, uso e cobertura da terra, tipos e propriedades físicas dos solos.

Para a configuração do cenário de simulação, foi definido o período de 2002 a 2020. Os três primeiros anos (2002 a 2004) foram utilizados como período de aquecimento do modelo, etapa fundamental para a estabilização dos armazenamentos internos do sistema, como a umidade do solo e os reservatórios subterrâneos, reduzindo incertezas associadas às condições iniciais, especialmente aquelas relacionadas à umidade antecedente e ao conteúdo de água no aquífero raso.

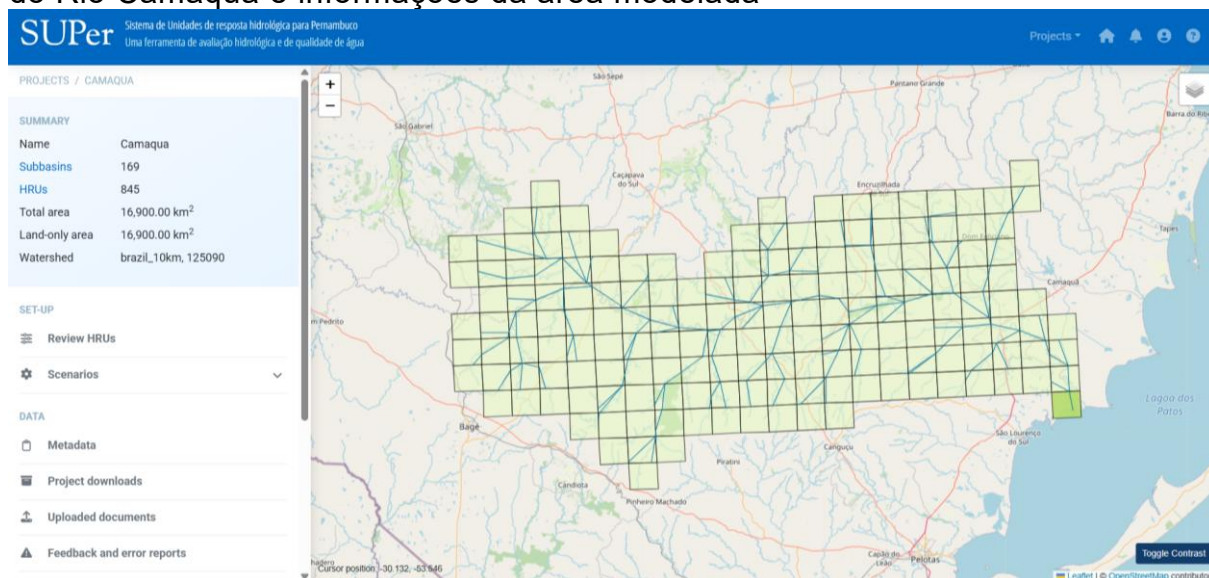
A calibração foi realizada utilizando o período mais recente, de 2005 a 2020, escolhido por apresentar padrões bem definidos de cheia e estiagem (SELL, 2025).

Quadro 3 - Períodos de simulação e dados hidrológicos utilizados no estudo

	Itens	Descrição
Período	Simulação	2002 – 2020
	Aquecimento	2002 – 2004 (3 anos)
	Calibração	2005 – 2020 (período mais recente, com cheias e secas bem definidas)
Dados de entrada	Precipitação	CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data)
	Clima (Temperatura)	CHIRTS (Climate Hazards Center InfraRed Temperature with Station Data)
	Físicos	Modelo Digital de Elevação (MDE), uso e cobertura da terra e tipos de solo
Resolução	Espacial	10 x 10 km
	Temporal	Dados agregados em escala mensal para simulação
Dados da estação fluviométrica	Estação fluviométrica	Passo do Mendonça
	Código da estação	87905000
	Fonte dos dados de vazão	Sistema HidroWeb (ANA)
	Período dos dados observados	1987 – 2020
	Critério de escolha da estação	Maior disponibilidade de dados e localização próxima à saída da bacia

Após a delimitação automática, a bacia modelada apresentou área total de 16.900,00 km², subdividida em 169 sub-bacias e 845 Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs) (Figura 10).

Figura 10 - Interface da plataforma BEST com a delimitação automática da Bacia do Rio Camaquã e informações da área modelada



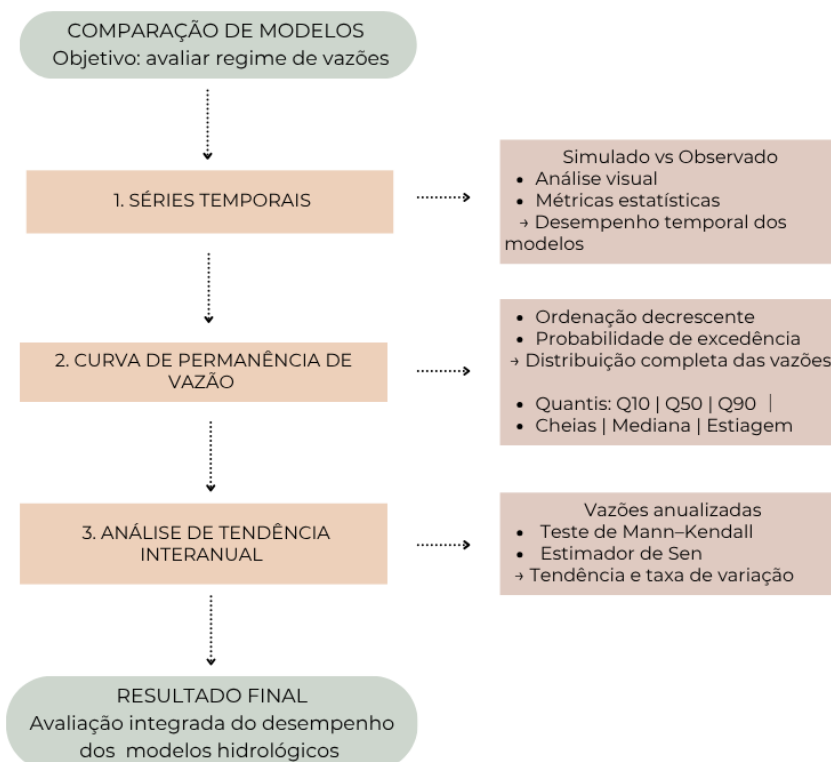
Fonte: BEST (2025)

A versão do modelo hidrológico utilizada foi o SWAT 2012, revisão 692, conforme descrito por Arnold *et al.* (1998) e Bressiani *et al.* (2015), integrada à plataforma BEST.

5.2.2.3. Estratégia de Comparação

A comparação entre os modelos foi conduzida com o objetivo de avaliar o comportamento do regime de vazões sob diferentes perspectivas analíticas, contemplando tanto o desempenho estatístico global quanto a representação de características hidrológicas específicas (Figura 11). A análise foi realizada na escala mensal, por permitir a investigação integrada da variabilidade sazonal e dos padrões interanuais de resposta da bacia hidrográfica.

Figura 11 - Fluxograma metodológico da comparação e avaliação do desempenho de modelos hidrológicos



Autora (2026)

Inicialmente, procedeu-se à comparação das séries temporais mensais simuladas e observadas, por meio de análise visual e aplicação de métricas estatísticas de desempenho. Essa etapa permitiu verificar a capacidade dos modelos em reproduzir a dinâmica temporal das vazões ao longo do período analisado.

Na sequência, foi construída a curva de permanência de vazão, obtida a partir da ordenação decrescente dos valores de vazão e da associação de cada elemento à respectiva probabilidade de excedência. A curva de permanência constitui instrumento amplamente utilizado na análise hidrológica por sintetizar, em uma única representação, o comportamento completo da distribuição das vazões, abrangendo eventos de cheia, condições médias e períodos de estiagem.

Foram extraídos os quantis Q10, Q50 e Q90, correspondentes às vazões associadas a 10%, 50% e 90% de excedência, respectivamente. Esses indicadores permitem avaliar o desempenho do modelo em diferentes segmentos do regime hidrológico, possibilitando identificar discrepâncias específicas na representação de vazões elevadas, medianas e mínimas.

Adicionalmente, realizou-se análise de tendência interanual das vazões anualizadas por meio do teste não paramétrico de Mann–Kendall, amplamente empregado em estudos hidrológicos para detecção de tendências monotônicas (Mashoudi *et al.*, 2025). A magnitude da tendência foi estimada pelo método de Sen, permitindo quantificar a taxa de variação anual da vazão simulada e compará-la com a série observada. Essa abordagem possibilitou avaliar a coerência temporal dos modelos na representação de padrões de longo prazo.

5.2.2.4. Métricas de Avaliação

A avaliação quantitativa do desempenho dos modelos foi realizada por meio de métricas estatísticas amplamente consolidadas na literatura hidrológica, aplicadas de forma consistente às séries mensais simuladas e observadas. Considerando $Q_{obs,i}$ como a vazão observada no instante i , $Q_{sim,i}$ como a vazão simulada correspondente e n como o número total de observações, as métricas foram definidas conforme descrito a seguir.

O Percent Bias (PBIAS) foi utilizado para quantificar o viés médio da simulação em relação aos valores observados, permitindo identificar tendência sistemática de superestimação ou subestimação ao longo do período analisado. Essa métrica é amplamente empregada na avaliação de modelos hidrológicos por sua capacidade de evidenciar erros sistemáticos acumulados (Gupta *et al.*, 1999; Moriasi *et al.*, 2007):

$$PBIAS = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}}$$

O Mean Absolute Error (MAE) foi empregado para estimar a magnitude média dos desvios absolutos entre valores simulados e observados. Por não elevar os erros ao quadrado, essa métrica apresenta menor sensibilidade a valores extremos, sendo útil para avaliar discrepâncias médias de forma equilibrada (Willmott & Matsuura, 2005):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_{sim,i} - Q_{obs,i}|$$

Complementarmente, o Root Mean Square Error (RMSE) foi calculado com o objetivo de avaliar a dispersão dos erros, sendo particularmente sensível a

discrepâncias de maior magnitude, o que o torna relevante na análise de eventos extremos (Chai & Draxler, 2014):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}$$

Além dessas métricas, foi estimado o coeficiente de eficiência de Nash–Sutcliffe (NSE), proposto por Nash e Sutcliffe (1970), amplamente utilizado na avaliação de modelos hidrológicos. O NSE avalia o poder preditivo do modelo ao comparar os erros de simulação com a variabilidade da série observada:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

Valores próximos de 1 indicam elevado desempenho, enquanto valores negativos indicam desempenho inferior ao uso da média observada como estimador.

Adicionalmente, foi calculado o índice Kling–Gupta (KGE), proposto por Gupta *et al.* (2009) como alternativa ao NSE, integrando três componentes do desempenho: correlação linear, viés médio e variabilidade relativa. Essa métrica permite decompor o desempenho do modelo e identificar possíveis desequilíbrios entre ajuste médio e representação da variabilidade:

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

onde r corresponde ao coeficiente de correlação entre séries simulada e observada, β representa a razão entre as médias simulada e observada, e γ corresponde à razão entre os coeficientes de variação das duas séries.

Para a análise de tendência temporal, utilizou-se o teste não paramétrico de Mann–Kendall, originalmente proposto por Mann (1945) e Kendall (1975), amplamente aplicado em séries hidrológicas para detecção de tendências monotônicas. A magnitude da tendência foi estimada pelo método de Sen (Sen, 1968), que calcula a mediana das inclinações entre todos os pares possíveis da série temporal, fornecendo estimativa robusta da taxa de variação anual.

As métricas foram calculadas tanto para o conjunto completo da série mensal quanto para classes de vazão definidas com base em percentis da série observada,

permitindo identificar diferenças de desempenho entre períodos de maior e menor disponibilidade hídrica.

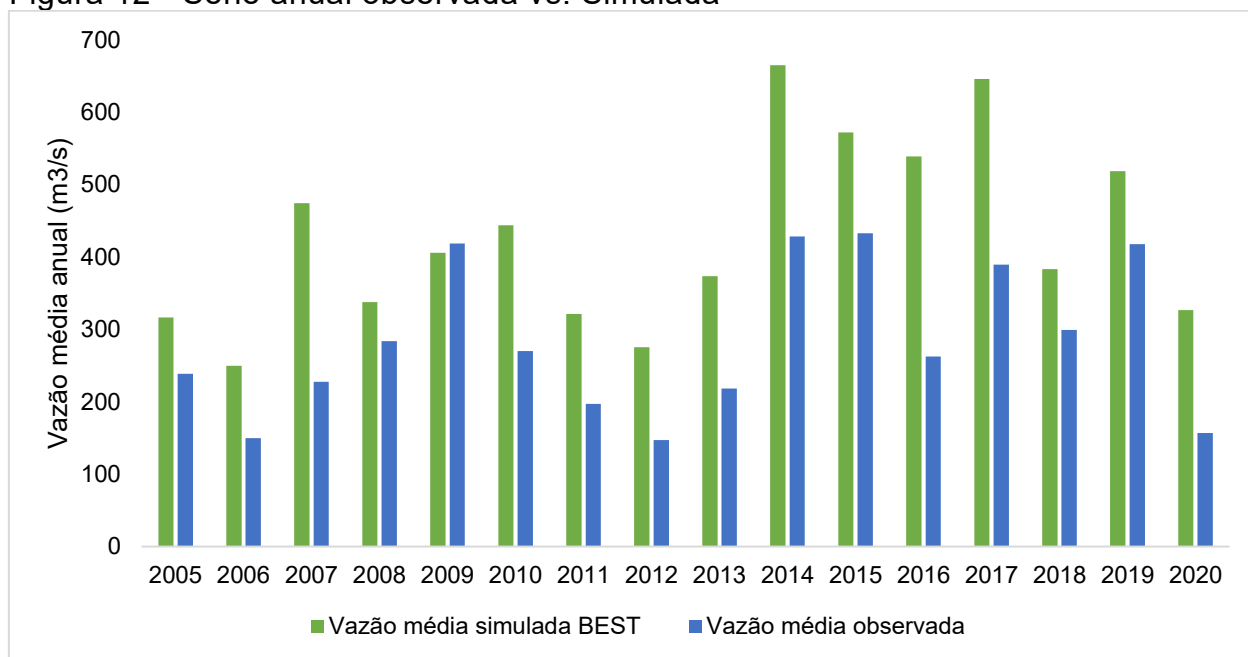
5.2.3. Resultados e discussão

5.2.3.1. Avaliação do Desempenho Hidrológico

A comparação entre as séries anuais e mensais observadas e simuladas evidencia que o modelo, em condição pré-calibração, reproduz o padrão sazonal da Bacia do Rio Camaquã, captando a alternância entre períodos de maior e menor disponibilidade hídrica. A comparação visual entre as séries pode ser observada nas Figuras 6 e 7, na qual se verifica coerência na dinâmica temporal, embora com diferenças sistemáticas na magnitude das vazões.

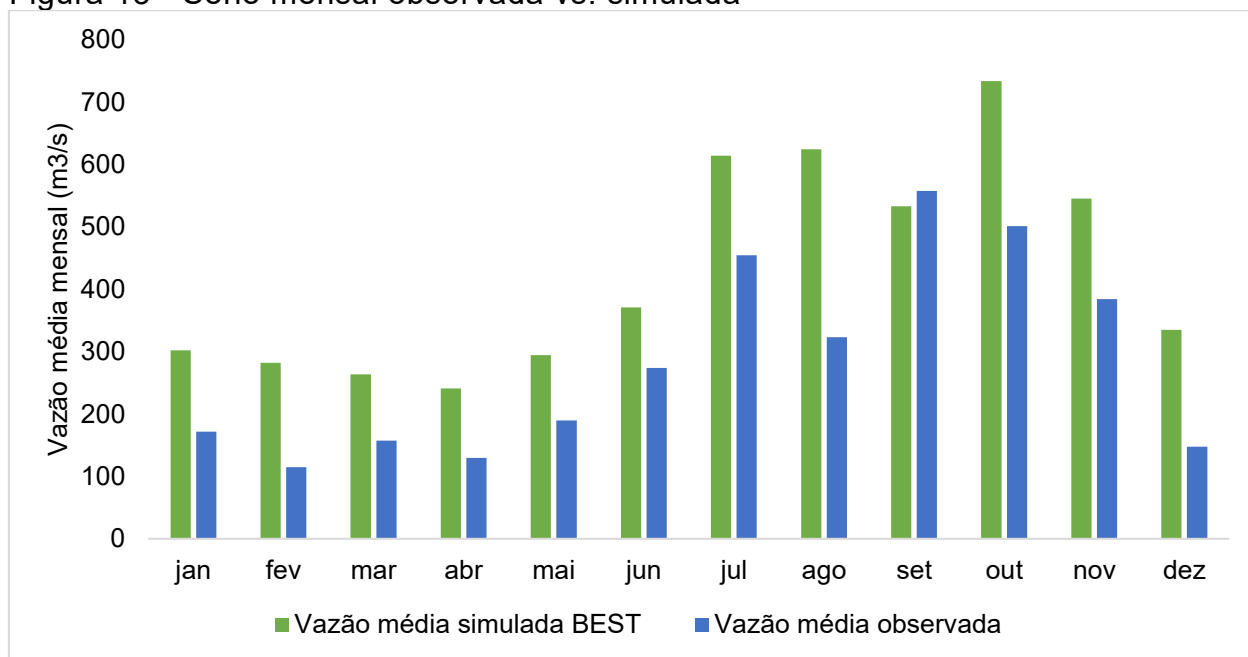
A análise das vazões médias anuais no período de 2005 a 2020 (Figura 12) evidencia que o modelo BEST reproduz a variabilidade interanual do regime hidrológico da Bacia do Rio Camaquã, porém com limitações quantitativas relevantes. Observa-se tendência sistemática de superestimação das vazões médias anuais, com valores simulados superiores aos observados na maior parte da série histórica. Essa discrepância é particularmente expressiva em anos como 2007, 2016 e 2020, nos quais os volumes simulados superam significativamente os registros observacionais, indicando não apenas acompanhamento da variabilidade hidrológica, mas amplificação dos volumes escoados. Ainda que em alguns anos o ajuste seja mais próximo, o padrão geral sugere viés positivo recorrente na escala interanual.

Figura 12 - Série anual observada vs. Simulada



Entretanto, a avaliação estatística do desempenho do modelo foi realizada com base na série mensal (Figura 13), permitindo análise mais detalhada da capacidade do BEST em representar a dinâmica sazonal da vazão.

Figura 13 - Série mensal observada vs. simulada



O valor de PBIAS = +46,3% indica forte viés positivo na escala mensal, evidenciando que o modelo superestima, em média, aproximadamente 46% das vazões observadas, o que ocorre pela ausência de calibração e pela alta resolução

espacial. Segundo os critérios de Moriasi *et al.* (2007), valores absolutos superiores a 25% caracterizam desempenho insatisfatório para simulações de vazão mensal. Esse resultado confirma quantitativamente o padrão visual observado, no qual diversos meses apresentam magnitudes simuladas significativamente superiores às observadas.

O coeficiente de Nash-Sutcliffe ($NSE = 0,405$) indica desempenho limitado. Embora o valor positivo demonstre que o modelo é superior ao uso da média observada como estimativa, ele se enquadra na faixa considerada insatisfatória para aplicações hidrológicas mensais. Esse resultado sugere que parte relevante da variabilidade temporal não é adequadamente explicada pelo modelo, especialmente nos meses de maior magnitude de vazão, que exercem maior influência no cálculo desse índice.

O coeficiente Kling-Gupta ($KGE = 0,502$) indica desempenho intermediário e limítrofe aceitável. Como o KGE considera simultaneamente correlação, viés e variabilidade, o valor obtido sugere que o modelo apresenta capacidade razoável de reproduzir o padrão temporal da série, mas com desequilíbrio importante entre média simulada e observada. O elevado PBIAS indica que o componente de viés é o principal fator responsável pela redução do desempenho global.

Em escala mensal, observa-se que a superestimação é mais acentuada nos meses de maior disponibilidade hídrica, como julho, agosto e outubro, indicando resposta hidrológica excessivamente sensível aos eventos de precipitação. Esse comportamento contribui diretamente para o viés positivo e compromete o NSE, uma vez que erros em períodos de alta vazão possuem maior peso estatístico. Além disso, a manutenção de vazões simuladas relativamente elevadas em meses de menor vazão observada, como fevereiro e dezembro, sugere dificuldade na representação adequada dos processos de recessão e armazenamento hídrico.

De forma integrada, os resultados indicam que, embora o modelo BEST reproduza a sazonalidade e a tendência temporal da vazão na bacia, seu desempenho quantitativo na escala mensal é comprometido por viés positivo expressivo. A análise anual evidencia a persistência desse padrão ao longo da série histórica, enquanto os indicadores estatísticos mensais confirmam que o erro não é episódico, mas sistemático. Assim, a aplicação do modelo para estimativas absolutas de vazão, especialmente em análises de magnitude de cheias, deve ser realizada com cautela,

sendo recomendável calibração adicional ou ajustes na parametrização dos processos de geração e armazenamento de escoamento.

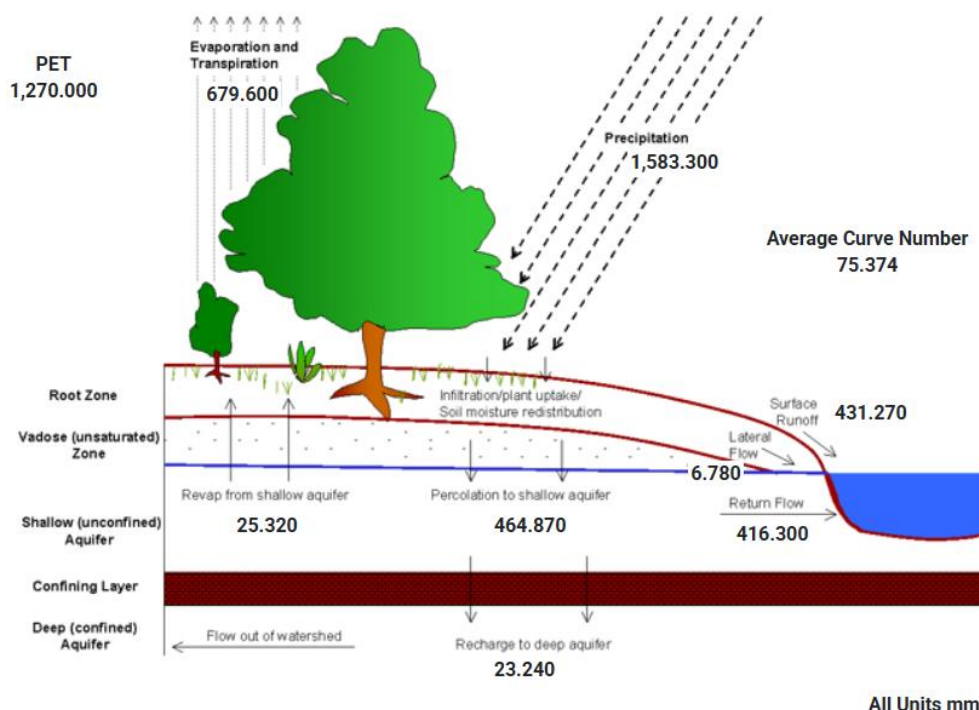
5.2.3.2. Análise do Balanço Hídrico e Implicações na Simulação

A análise do balanço hídrico médio anual do modelo BEST (Figura 14) em sua configuração não calibrada fornece elementos adicionais para compreender o viés positivo identificado na avaliação estatística. Por se tratar de uma simulação sem ajuste paramétrico específico para a Bacia do Rio Camaquã, os fluxos estimados refletem predominantemente a estrutura conceitual do modelo e seus parâmetros iniciais.

Observa-se que aproximadamente 43% da precipitação anual é convertida em evapotranspiração ($ET/P = 0,429$), proporção relativamente inferior ao esperado para condições subtropicais do sul do Brasil. Esse resultado indica que, quando o modelo é utilizado sem o processo de calibração, ele tende a representar de forma inadequada o balanço hídrico da bacia, especialmente no que se refere às perdas por evapotranspiração.

Ao subestimar essas perdas atmosféricas, o modelo mantém uma quantidade maior de água no sistema do que a que seria esperada em condições reais. Como consequência, essa água adicional permanece disponível para ser convertida em escoamento superficial e subsuperficial, o que pode levar a uma superestimação das vazões simuladas. Dessa forma, observa-se um desequilíbrio na partição da precipitação, evidenciando a importância da calibração para ajustar os parâmetros hidrológicos e garantir uma representação mais realista dos processos de transferência de água na bacia.

Figura 14 - Distribuição dos Fluxos Hidrológicos no Modelo BEST



Fonte: BEST (2026)

Adicionalmente, a soma do escoamento superficial (431 mm) e do fluxo de retorno ao canal (416 mm) indica que mais de 50% da precipitação anual é convertida em vazão. Tal proporção é elevada para uma bacia de grande porte com cobertura natural e agrícola predominante, indicando que, em sua configuração inicial, o modelo favorece a geração de escoamento em detrimento de processos de armazenamento e dissipação hídrica (Dingman, 2015). Esse comportamento é coerente com o número médio da curva (CN = 75,37), que promove maior conversão da precipitação em escoamento superficial.

A recarga profunda representa apenas 1,5% da precipitação anual, evidenciando limitada transferência de água para aquíferos profundos. Essa partição do balanço hídrico sugere que o modelo, sem calibração, concentra a maior parte dos fluxos no sistema superficial e no aquífero raso, contribuindo para manutenção de vazões simuladas elevadas ao longo do ano.

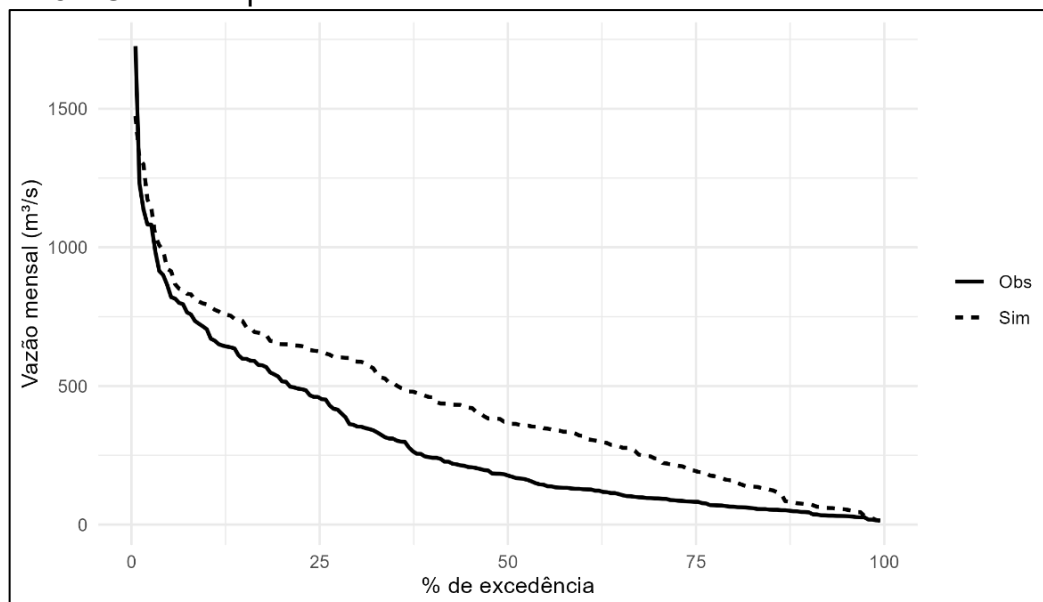
Portanto, o desequilíbrio observado nos componentes do balanço hídrico do BEST não calibrado fornece explicação física consistente para a superestimação sistemática das vazões mensais e anuais. Os resultados indicam que o viés identificado decorre, em grande parte, da configuração estrutural e paramétrica inicial

do modelo, reforçando a necessidade de calibração para adequação da partição da precipitação às características hidrológicas específicas da bacia estudada.

5.2.3.3. Métricas Globais e representação do Regime Hidrológico: Curva de Permanência

A análise da curva de permanência permite avaliar o desempenho do modelo BEST ao longo de todo o espectro de vazões. A forma geral da curva simulada acompanha a curva observada, mantendo padrão semelhante de declividade, o que indica preservação da hierarquia relativa das vazões. A representação gráfica dessa comparação é apresentada na Figura 15.

Figura 15 - Curva de permanência



Entretanto, diferenças quantitativas relevantes foram identificadas nos quantis analisados. Para o Q10, o valor observado foi de $704,58 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto o modelo estimou $794,50 \text{ m}^3/\text{s}$, resultando em erro percentual de 12,76%, caracterizando superestimação moderada das vazões elevadas.

Para o Q50, a discrepância foi mais expressiva: o valor observado de $177,12 \text{ m}^3/\text{s}$ foi superestimado para $370,69 \text{ m}^3/\text{s}$ (erro percentual de 109,29%). Já no Q90, associado a condições de estiagem, o valor observado de $44,21 \text{ m}^3/\text{s}$ foi estimado como $73,63 \text{ m}^3/\text{s}$ (erro percentual de 66,55%).

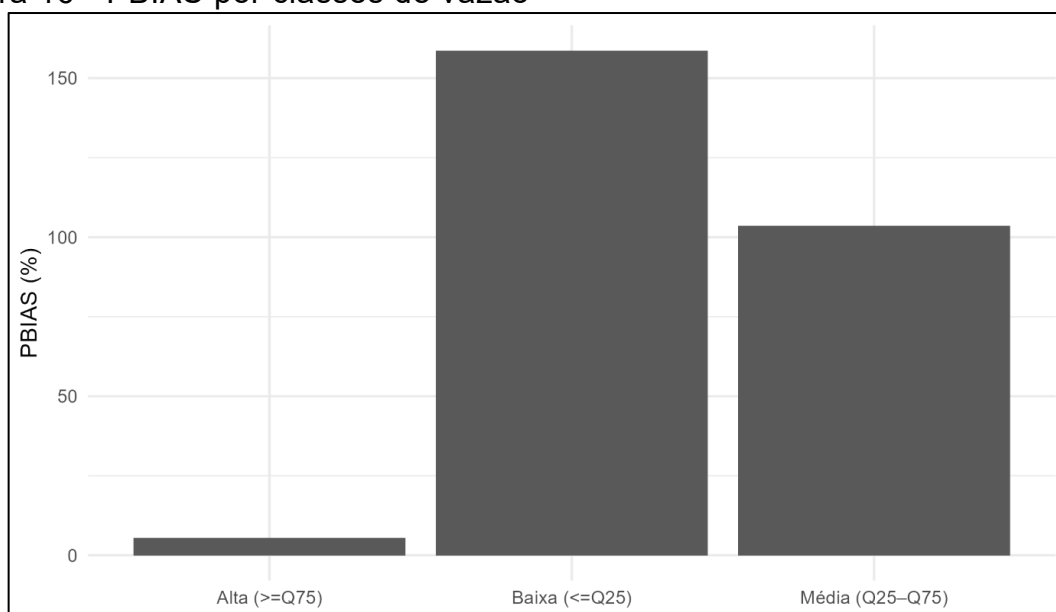
Esses resultados indicam deslocamento vertical da curva simulada em relação à observada, sugerindo maior contribuição simulada de armazenamento subterrâneo

ou fluxo de base. Ainda assim, a preservação da forma geral da curva reforça a coerência estrutural do modelo na representação do regime hidrológico.

5.2.3.4. Desempenho por Classes de Vazão

A análise das métricas por classes de vazão permite aprofundar a interpretação das diferenças observadas. O comportamento do viés médio em cada classe pode ser visualizado na Figura 16.

Figura 16 - PBIAS por classes de vazão



Na classe de vazões baixas ($\leq Q25$), o PBIAS foi de 158,62%, indicando superestimação acentuada. O MAE (76,47 m³/s) e o RMSE (104,15 m³/s) evidenciam dispersão considerável, ainda que em magnitudes absolutas menores.

Na faixa de vazões médias (Q25–Q75), o PBIAS foi de 103,55%, com MAE de 213,77 m³/s e RMSE de 244,03 m³/s. Como essa classe representa a maior parte da série mensal ($n = 95$), ela concentra a maior contribuição para o erro global do modelo.

Na classe de altas vazões ($\geq Q75$), o PBIAS foi significativamente menor (5,44%), indicando desempenho relativamente mais equilibrado na simulação de eventos de maior magnitude. Embora os valores de MAE (190,47 m³/s) e RMSE (244,21 m³/s) permaneçam elevados, o viés reduzido sugere maior robustez relativa na representação do escoamento superficial.

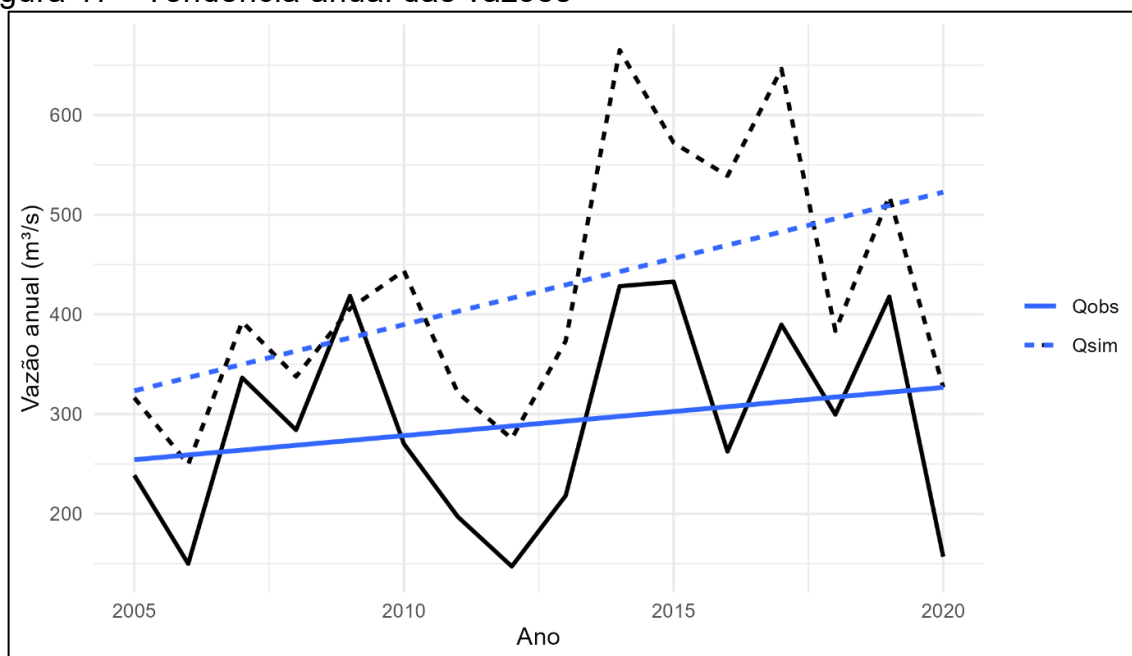
Esse padrão indica que o modelo BEST responde de forma mais consistente aos eventos diretamente associados à precipitação recente, enquanto os processos

de infiltração e armazenamento apresentam maior discrepância na configuração pré-calibrada.

5.2.3.5. Tendência Interanual

A análise da série anualizada revelou ausência de tendência estatisticamente significativa na série observada, com $\tau = 0,133$ ($p = 0,499$) e inclinação de Sen de 4,58 m³/s por ano. A comparação entre as séries anualizadas observada e simulada é apresentada na Figura 17.

Figura 17 - Tendência anual das vazões



Para a série simulada, o coeficiente τ foi de 0,317 ($p = 0,096$), indicando tendência positiva mais pronunciada. A inclinação estimada pelo método de Sen foi de 14,39 m³/s por ano, aproximadamente três vezes superior à observada.

Esses resultados indicam que o modelo BEST reproduz corretamente a direção da tendência interanual, mas superestima sua magnitude. Tal comportamento sugere sensibilidade ampliada às variações interanuais da precipitação ou à forma como os processos de armazenamento são representados na parametrização padrão.

5.2.3.6. Implicações para a Gestão da Bacia do Rio Camaquã

Do ponto de vista aplicado, os resultados indicam que o modelo BEST, mesmo antes da calibração, fornece informações qualitativas consistentes sobre o

comportamento do regime hidrológico. A preservação da forma da curva de permanência e da direção da tendência interanual pode subsidiar análises exploratórias e avaliações preliminares de cenários.

Entretanto, a superestimação sistemática das vazões médias e de estiagem indica que aplicações que demandem elevada precisão quantitativa, como definição de vazões de referência para outorga ou avaliação detalhada de disponibilidade hídrica, exigem etapa de calibração específica.

Assim, os resultados evidenciam que a análise pré-calibrada contribui para compreensão estrutural do modelo e amplia a transparência metodológica, mas não substitui o processo de ajuste paramétrico quando o objetivo envolve estimativas quantitativas de maior rigor.

5.2.3.7. Comparação com o estudo de Sell (2025)

A comparação com o estudo desenvolvido por Sell (2025) para a Bacia do Rio Camaquã permite contextualizar de forma mais precisa os resultados obtidos nesta pesquisa e aprofundar a discussão acerca do papel da calibração no desempenho de modelos hidrológicos. No referido trabalho, o modelo SWAT+ foi submetido a processo de calibração paramétrica, alcançando desempenho considerado muito bom no passo de tempo mensal, com NSE igual a 0,79, RMSE de 128,63 m³/s e PBIAS de -0,95%. Esses resultados indicam elevada capacidade de reprodução da variabilidade temporal da vazão, com viés praticamente inexistente. No passo diário, o desempenho foi inferior (NSE = 0,69; RMSE = 238,13 m³/s; PBIAS = -18,78%), comportamento esperado em função da maior variabilidade associada à escala temporal mais detalhada.

No presente estudo, conduzido em condição pré-calibração, o modelo apresentou NSE igual a 0,405, PBIAS de +46,3% e KGE de 0,502 no passo mensal. A comparação direta desses valores evidencia diferença substancial de desempenho estatístico. Enquanto o NSE de 0,79 obtido por Sell (2025) indica forte concordância entre valores simulados e observados após calibração, o valor de 0,405 encontrado nesta pesquisa revela capacidade moderada de reprodução da variabilidade mensal, porém com limitações relevantes na magnitude das vazões simuladas.

O contraste é ainda mais evidente na análise do viés. No modelo calibrado por Sell (2025), o PBIAS de -0,95% indica equilíbrio praticamente perfeito entre volumes simulados e observados. Em contrapartida, o PBIAS de +46,3% observado neste

estudo revela superestimação expressiva do volume total escoado ao longo do período analisado. Essa diferença evidencia o papel determinante da calibração na correção de desequilíbrios sistemáticos associados aos parâmetros que controlam infiltração, armazenamento no solo e contribuição do fluxo de base.

A análise da curva de permanência reforça essa distinção. No estudo de Sell (2025), as vazões de referência apresentaram diferenças percentuais moderadas: subestimação de 24% no Q10 (797 m³/s observados e 610 m³/s simulados), superestimação de 16% no Q50 (210 m³/s observados e 244 m³/s simulados) e subestimação de 14% no Q90 (48 m³/s observados e 41 m³/s simulados). Esses resultados indicam ajuste relativamente equilibrado ao longo do regime hidrológico após calibração.

No presente estudo, embora a forma geral da curva de permanência tenha sido preservada, as discrepâncias quantitativas foram mais expressivas. Para o Q10, observou-se superestimação de 12,76%; para o Q50, a superestimação ultrapassou 100%; e para o Q90, o erro percentual foi de 66,55%. Esse deslocamento mais acentuado da curva evidencia que, na ausência de calibração, o modelo tende a amplificar a magnitude das vazões, especialmente nas faixas média e de estiagem.

O valor de KGE igual a 0,502, obtido neste estudo, sugere que parte da estrutura estatística da série, incluindo correlação temporal e variabilidade relativa, foi mantida, ainda que com viés elevado. Esse resultado indica que o modelo, mesmo sem ajuste paramétrico, preserva coerência na representação do padrão temporal da vazão, mas carece de refinamento quantitativo.

A comparação com Sell (2025) demonstra, portanto, que a calibração exerce papel decisivo na melhoria do desempenho estatístico global, elevando o NSE e reduzindo substancialmente o viés. Contudo, também evidencia que a representação dos processos hidrológicos fundamentais permite captar padrões estruturais do regime mesmo antes da etapa de otimização paramétrica. As diferenças observadas entre os dois estudos parecem estar associadas principalmente ao ajuste dos parâmetros responsáveis pelo controle do armazenamento e da liberação de água no sistema, e não à incapacidade de representação dos mecanismos hidrológicos essenciais.

Essa análise comparativa contribui para uma compreensão mais aprofundada do papel da calibração na modelagem hidrológica da Bacia do Rio Camaquã,

distinguindo claramente entre coerência estrutural e adequação quantitativa da resposta simulada.

5.2.4. Conclusão

Este estudo comparou o comportamento hidrológico do modelo Brazilian Ecohydrological Simulation Tool (BEST), em condição não calibrada, com o modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT+), previamente calibrado, na Bacia do Rio Camaquã, utilizando métricas do regime de vazões.

Os resultados indicaram que, apesar da ausência de calibração, o BEST apresentou desempenho estruturalmente consistente, reproduzindo padrões gerais observados nas séries temporais mensais, na curva de permanência e na tendência interanual. As principais diferenças em relação ao SWAT+ estiveram associadas à magnitude das vazões simuladas e à distribuição dos erros entre diferentes classes de vazão, o que era esperado em função do processo de calibração aplicado ao SWAT+.

De modo geral, ambos os modelos foram capazes de representar adequadamente a estrutura do regime hidrológico da bacia, incluindo comportamentos associados a cheias, condições medianas e estiagens, ainda que com variações na intensidade das respostas simuladas. A análise de tendência interanual também indicou que o BEST reproduziu o sinal temporal das vazões observadas, sugerindo coerência na representação da dinâmica hidrológica de longo prazo.

Além disso, a comparação entre os modelos evidenciou que diferentes abordagens de simulação podem alcançar resultados satisfatórios na caracterização do regime hidrológico, mesmo quando baseadas em níveis distintos de parametrização e complexidade. Esse aspecto reforça a importância de considerar não apenas indicadores tradicionais de desempenho, mas também a capacidade dos modelos em representar processos e padrões hidrológicos relevantes para a gestão dos recursos hídricos.

Esses resultados indicam que a estrutura conceitual do modelo exerce influência significativa sobre seu desempenho, permitindo que o BEST apresente comportamento hidrológico satisfatório mesmo sem calibração formal. Assim, o modelo se mostra promissor como ferramenta complementar ao SWAT+, especialmente em contextos com limitação de dados ou necessidade de simulações mais rápidas.

Por fim, recomenda-se a calibração do BEST em estudos futuros, a fim de avaliar possíveis melhorias de desempenho e aprofundar a comparação entre as abordagens de modelagem aplicadas à Bacia do Rio Camaquã. Adicionalmente, sugere-se sua aplicação em outras bacias hidrográficas, com diferentes características climáticas, fisiográficas e de uso do solo, visando verificar sua robustez, capacidade de generalização e potencial de utilização em distintos contextos hidrológicos.

6. Considerações Finais

A presente dissertação teve como objetivo central analisar a influência da representação da precipitação e da configuração estrutural de modelos hidrológicos na simulação da vazão da Bacia do Rio Camaquã, integrando duas abordagens complementares: a avaliação de produtos de precipitação aplicados à modelagem hidrológica na América do Sul e a comparação do desempenho estrutural entre modelos aplicados à bacia em diferentes condições de calibração.

No primeiro artigo, a revisão sistemática da literatura evidenciou que a qualidade da precipitação utilizada como dado de entrada exerce influência direta sobre o desempenho das simulações hidrológicas. A literatura demonstra que, embora produtos satelitais apresentem vantagens em termos de cobertura espacial e disponibilidade temporal, sua utilização requer avaliação criteriosa das incertezas associadas. Esse resultado reforça a importância de analisar criticamente as bases de dados climáticas antes de sua incorporação em modelos hidrológicos.

No segundo artigo, a análise estrutural comparativa entre o modelo calibrado apresentado por Sell (2025) e o modelo executado em condição pré-calibração permitiu distinguir o papel da calibração na adequação quantitativa das simulações. O modelo calibrado apresentou desempenho estatístico elevado ($NSE = 0,79$ e $PBIAS$ próximo de zero no passo mensal), demonstrando forte concordância com a série observada. Por outro lado, o modelo em condição pré-calibrada apresentou $NSE = 0,405$, $PBIAS = +46,3\%$ e $KGE = 0,502$, evidenciando superestimação sistemática das vazões, sobretudo nas faixas média e de estiagem.

Entretanto, mesmo com desempenho estatístico inferior, o modelo pré-calibrado preservou padrões fundamentais do regime hidrológico da bacia, incluindo sazonalidade mensal, hierarquia relativa das vazões na curva de permanência e direção da tendência interanual. Essa constatação sugere que a representação dos processos hidrológicos é capaz de capturar a dinâmica estrutural do sistema, ainda que a magnitude da resposta dependa do ajuste paramétrico.

A integração dos dois artigos permite concluir que a confiabilidade da modelagem hidrológica depende de dois pilares interdependentes: a qualidade dos dados de entrada, especialmente da precipitação, e o ajuste adequado dos parâmetros que controlam os processos internos do modelo. A precipitação condiciona o volume potencial de escoamento, enquanto a calibração regula a

redistribuição interna da água entre armazenamento, infiltração e escoamento superficial.

Do ponto de vista aplicado, os resultados indicam que modelos executados em condição pré-calibração podem fornecer informações estruturais relevantes para análises exploratórias e avaliações preliminares do regime hidrológico. Contudo, aplicações que demandem precisão quantitativa, como definição de vazões de referência para outorga ou planejamento de alocação hídrica, requerem calibração específica.

Assim, a dissertação reforça a hipótese de que a representação estrutural dos processos hidrológicos influencia significativamente a resposta simulada, mas que a qualidade dos dados de entrada e o ajuste paramétrico são determinantes para a precisão quantitativa das estimativas. A abordagem adotada contribui para maior transparência metodológica na modelagem hidrológica aplicada à Bacia do Rio Camaquã e amplia a compreensão sobre as interações entre dados climáticos, estrutura de modelos e desempenho estatístico.

7. Referências

ALAWI, Sayed Amir; ÖZKUL, Sevinç. Evaluation of satellite-based precipitation data sets in hydrological modeling using Soil & Water Assessment Tool (SWAT). **Arabian Journal Of Geosciences**, [S.L.], v. 16, n. 5, p. 1-9, maio 2023. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12517-023-11434-w>.

ALEMU, Melkamu Meseret; BAWOKE, Getnet Taye. Analysis of spatial variability and temporal trends of rainfall in Amhara region, Ethiopia. **Journal Of Water And Climate Change**, [S.L.], v. 11, n. 4, p. 1505-1520, 4 out. 2019. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/wcc.2019.084>.

ALMEIDA, Karinnie Nascimento de *et al.* Performance analysis of TRMM satellite in precipitation estimation for the Itapemirim River basin, Espírito Santo state, Brazil. **Theoretical And Applied Climatology**, [S.L.], v. 141, n. 3-4, p. 791-802, 12 maio 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-020-03204-5>.

ANDRADE, João M. *et al.* Efficiency of global precipitation datasets in tropical and subtropical catchments revealed by large sampling hydrological modelling. **Journal Of Hydrology**, [S.L.], v. 633, p. 131016, abr. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131016>.

ANSELM, Norbert *et al.* Spatiotemporal Variability of Precipitation and Its Statistical Relations to ENSO in the High Andean Rio Bogotá Watershed, Colombia. **Earth Interactions**, [S.L.], v. 24, n. 3, p. 1-17, 1 set. 2020. American Meteorological Society. <http://dx.doi.org/10.1175/ei-d-19-0019.1>.

ANZOLIN, Gabriel *et al.* Nonstationary frequency analysis of extreme precipitation: embracing trends in observations. **Journal Of Hydrology**, [S.L.], v. 637, p. 131300, jun. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131300>.

ARAÚJO, H. L. *et al.* Análise comparativa entre dados de precipitação observados em superfície e estimados por satélite TRMM na região norte do Tocantins. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v.10, n.1, p.14–22, 2022. <https://10.66205/rvbma.v10i1.995>.

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), p. 959-975, 2017.

ARNOLD, J. G., *et al.* SWAT: Model use, calibration, and validation, American Society of Agricultural and Biological Engineers, 55 (4), p. 1491–1508, 2012.

BACK, A. J. *et al.* Erosivity index for Brazil based on climatological normals from 1991 to 2020. *Holos*, 2023.

BALTAZAR, L. A. *et al.* Hydrological modeling in a region with sparsely observed data in the eastern Central Andes of Peru. *Journal of South American Earth Sciences*, v.121, p.104151, 2023.

BATISTA, Flávia Ferreira; RODRIGUES, Daniele Tôrres; SILVA, Cláudio Moisés Santos e. Analysis of climatic extremes in the Parnaíba River Basin, Northeast Brazil, using GPM IMERG-V6 products. **Weather And Climate Extremes**, [S.L.], v. 43, p. 100646, mar. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wace.2024.100646>.

BECK, Hylke E. *et al.* Global-scale evaluation of 22 precipitation datasets using gauge observations and hydrological modeling. **Hydrology And Earth System Sciences**, [S.L.], v. 21, n. 12, p. 6201-6217, 8 dez. 2017. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-21-6201-2017>.

BENÍTEZ, Victoria D. *et al.* Can Satellite Products Recognise Extreme Precipitation Over Southeastern South America? **International Journal Of Climatology**, [S.L.], v. 45, n. 4, p. 15, 2 jan. 2025. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.8741>.

BLANCO, M *et al.* Validación y corrección de estimaciones de precipitación satelital utilizando observaciones en superficie en la región pampeana argentina. **Tecnología y Ciencias del Agua**, [S.L.], v. 14, n. 2, p. 110-168, 1 mar. 2023. Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua. <http://dx.doi.org/10.24850/j-tyca-14-02-04>.

BRASIL NETO, Reginaldo Moura *et al.* Evaluation of the TRMM Product for Monitoring Drought over Paraíba State, Northeastern Brazil: a statistical analysis. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 12, n. 14, p. 2184, 8 jul. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12142184>.

BRÊDA, João Paulo Lyra Fialho *et al.* Assessing extreme precipitation from a regional climate model in different spatial–temporal scales: a hydrological perspective in south america. **International Journal Of Climatology**, [S.L.], v. 42, n. 16, p. 8904-8927, 10 jul. 2022. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.7782>.

BRESSIANI, D. A. *et al.* Effects of spatial and temporal weather data resolutions on streamflow modeling of a semi-arid basin, Northeast Brazil. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* v. 8, n.3, p. 125–139, 2015a.

BRESSIANI, D. A.; *et al.* Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, v. 8, p. 9-35, 2015b.

BRESSIANI, D. *et al.* An open collaborative web-based Brazilian Ecohydrological Simulation Tool – BEST. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 25., 2023, Aracaju. Anais. Porto Alegre: ABRHidro, 2023.

CARDOSO JUNIOR, Marcio *et al.* Geomorphic expression of shear zones in Southern Brazilian and Uruguayan Shields. **Geomorphology**, [S.L.], v. 382, p. 107678, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107678>.

CASSALHO, Felício *et al.* Hydrologic Validation of MERGE Precipitation Products over Anthropogenic Watersheds. **Water**, [S.L.], v. 12, n. 5, p. 1268, 29 abr. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w12051268>.

CHAI, T.; DRAXLER, R. R.. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. **Geoscientific Model Development**, [S.L.], v. 7, n. 3, p. 1247-1250, 30 jun. 2014. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>.

CHEN, Shengyue; HUANG, Jinliang; HUANG, Jr-Chuan. Improving daily streamflow simulations for data-scarce watersheds using the coupled SWAT-LSTM approach. **Journal Of Hydrology**, [S.L.], v. 622, p. 129734, jul. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129734>.

COSTA, David de Andrade *et al.* Water availability and extreme events under climate change scenarios in an experimental watershed of the Brazilian Atlantic Forest. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 946, p. 174417, out. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174417>.

COSTA, Julio Cezar *et al.* VALIDAÇÃO DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO ESTIMADOS PELO CHIRPS PARA O BRASIL. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S.L.], v. 24, p. 228-243, 11 jun. 2019. ABClima (Brazilian Association of Climatology). <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v24i0.60237>.

COUTINHO, Eluã Ramos *et al.* Application of Artificial Neural Networks (ANNs) in the Gap Filling of Meteorological Time Series. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S.L.], v. 33, n. 2, p. 317-328, jun. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786332013>.

COSTA, Fagner França da *et al.* Performance evaluation of four remote-sensing products throughout precipitation estimation in the State of Paraíba, Northeast Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, [S.L.], v. 35, p. 101256, ago. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101256>.

DANESHVAR, M. R. Mansouri; FREUND, F. T.. Survey of a relationship between precipitation and major earthquakes along the Peru-Chilean trench (2000–2015). **The European Physical Journal Special Topics**, [S.L.], v. 230, n. 1, p. 335-351, jan. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1140/epjst/e2020-000267-8>.

ALMEIDA, Vinícius Albuquerque de; MARTON, Edilson; NUNES, Ana M. B.; NUNES, Ana M. B.. Assessing the ability of three global reanalysis products to reproduce South American monsoon precipitation. **Atmósfera**, [S.L.], v. 31, n. 1, p. 1-10, 1 jan. 2018. Universidad Nacional Autonoma de Mexico. <http://dx.doi.org/10.20937/atm.2018.31.01.01>.

DEE, D. P. *et al.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal Of The Royal Meteorological Society**, [S.L.], v. 137, n. 656, p. 553-597, abr. 2011. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/qj.828>.

DERIN, Yagmur *et al.* Multiregional Satellite Precipitation Products Evaluation over Complex Terrain. **Journal Of Hydrometeorology**, [S.L.], v. 17, n. 6, p. 1817-1836, 1 jun. 2016. American Meteorological Society. <http://dx.doi.org/10.1175/jhm-d-15-0197.1>.

DINGMAN, S. L. Physical hydrology. 3. ed. **Long Grove**: Waveland Press, 2015.

DOMINGUES, Giancarlo *et al.* Analysis of field monitoring of precipitation and pore pressure over seven years at Morro do Boi of Serra do Mar/Brazil. **Soils And Rocks**, [S.L.], v. 47, n. 4, p. 1-15, 4 nov. 2024. ABMS - Brazilian Association for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. <http://dx.doi.org/10.28927/sr.2024.011823>.

REIS, Alberto Assis dos; FERNANDES, Wilson dos Santos; RAMOS, Maria-Helena. Assessing two precipitation data sources at basins of special interest to hydropower production in Brazil. **Rbrh**, [S.L.], v. 25, p. 1-16, 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.252020190068>.

ENSSLIN, L. *et al.* ProKnow-C: processo de análise sistêmica. Brasil, 2010.

FABABA, Jose Carlos Coello; MONTES, Victoria Calle. Effect of the low-level jet stream on the occurrence of precipitation in the Peruvian jungle. **Ecología Aplicada**, [S.L.], v. 20, n. 2, p. 147-159, 30 dez. 2021. Universidad Nacional Agraria la Molina. <http://dx.doi.org/10.21704/rea.v20i2.1805>.

FERNANDEZ-PALOMINO, Carlos Antonio *et al.* A novel high-resolution gridded precipitation dataset for Peruvian and Ecuadorian watersheds – development and hydrological evaluation. **Journal Of Hydrometeorology**, [S.L.], p. 309-336, 13 dez. 2021. American Meteorological Society. <http://dx.doi.org/10.1175/jhm-d-20-0285.1>.

FERRAZ, Lorena Lima *et al.* Hydrological modeling in an agricultural basin in the Brazilian Cerrado using satellite precipitation data. **Journal Of South American Earth Sciences**, [S.L.], v. 130, p. 104548, out. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104548>.

FISCHER FILHO, J. A.; FUZZO, D. F. da S. 2022. Validação dos dados de precipitação e temperatura do ar da reanálise ERA5 - Interim do ECMWF. In: Oliveira-Costa; J. L. R.; Zacharias, A. A.; Pancher, A. M. (org). Métodos e técnicas no estudo da dinâmica da paisagem física nos países da CPLP - comunidade dos países de expressão portuguesa 402 p.

FONSECA, Humberto Paiva; PIRES, Gabrielle Ferreira; BRUMATTI, Livia Maria. Spatial and Temporal Evolution of Sowing and the Onset of the Rainy Season in a Region of Large Agricultural Expansion in Brazil. **Agronomy**, [S.L.], v. 12, n. 7, p. 1679, 15 jul. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy12071679>.

FUNK, Chris *et al.* The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 1-21, 8 dez. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/sdata.2015.66>.

FUSHIMI, Melina *et al.* Changes in Land Use and Cover and Their Environmental Impacts in the Cerrado of Mato Grosso Do Sul, Brazil. **Sustainability**, [S.L.], v. 16, n. 10, p. 4266, 18 maio 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su16104266>.

GARNIER, Jeremie *et al.* Water Resources Monitoring in a Remote Region: earth observation-based study of endorheic lakes. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 16, n. 15, p. 2790, 30 jul. 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs16152790>.

GONZÁLEZ, Marcela *et al.* Statistical Seasonal Rainfall Forecast in the Neuquén River Basin (Comahue Region, Argentina). **Climate**, [S.L.], v. 3, n. 2, p. 349-364, 29 maio 2015. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/cli3020349>.

GUPTA, Hoshin Vijai; SOROOSHIAN, Soroosh; YAPO, Patrice Ogou. Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: comparison with multilevel expert calibration. **Journal Of Hydrologic Engineering**, [S.L.], v. 4, n. 2, p. 135-143, abr. 1999. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(1999)4:2(135)).

HERSBACH, Hans *et al.* The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal Of The Royal Meteorological Society**, [S.L.], v. 146, n. 730, p. 1999-2049, 15 jun. 2020. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/qj.3803>.

HUFFMAN, G. J. *et al.* NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG). **Journal of Hydrometeorology**. 2019.

HURTADO, Santiago I. *et al.* Infilling methods for monthly precipitation records with poor station network density in Subtropical Argentina. **Atmospheric Research**, [S.L.], v. 254, p. 105482, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105482>.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Radar meteorológico. Brasília: INMET, 2024.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Sixth Assessment Report: the numbers behind the science. Geneva, 2022.

JIANG, Anna *et al.* Improving hydrological process simulation in mountain watersheds: integrating wrf model gridded precipitation data into the swat model. **Journal Of Hydrology**, [S.L.], v. 639, p. 131687, ago. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131687>.

JOYCE, Robert J. *et al.* CMORPH: a method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. **Journal Of Hydrometeorology**, [S.L.], v. 5, n. 3, p. 487-503, jun. 2004. American Meteorological Society. [http://dx.doi.org/10.1175/1525-7541\(2004\)0052.0.co;2](http://dx.doi.org/10.1175/1525-7541(2004)0052.0.co;2).

JUNQUEIRA, Rubens *et al.* Hydrological modeling using remote sensing precipitation data in a Brazilian savanna basin. **Journal Of South American Earth**

Sciences, [S.L.], v. 115, p. 103773, abr. 2022. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.isames.2022.103773>.

KENDALL, M. G. Rank correlation methods. 4. ed. London: Charles Griffin, 1975.

KUBOTA, T. *et al.* (2007). *Global precipitation map using satellite-borne microwave radiometers by the GSMP project*. **Journal of the Meteorological Society of Japan**

KUMMEROW, C., *et al.* (1998). *The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package*. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**.

LÓPEZ, Patricia López *et al.* Spatial Downscaling of Satellite-Based Precipitation and Its Impact on Discharge Simulations in the Magdalena River Basin in Colombia. **Frontiers In Earth Science**, [S.L.], v. 6, p. 1-23, 8 jun. 2018. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/feart.2018.00068>.

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica**, v. 13, n. 3, p. 245–259, 1945.

MANZ, Bastian *et al.* Comparative Ground Validation of IMERG and TMPA at Variable Spatiotemporal Scales in the Tropical Andes. **Journal Of Hydrometeorology**, [S.L.], v. 18, n. 9, p. 2469-2489, 1 set. 2017. American Meteorological Society. <http://dx.doi.org/10.1175/jhm-d-16-0277.1>.

MARTÍNEZ-CASTRO, Daniel *et al.* Extreme Droughts in the Peruvian Amazon Region (2000–2024). **Water**, [S.L.], v. 17, n. 12, p. 1744, 10 jun. 2025. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w17121744>.

MARTINS, Isabelle Lima; ALCÂNTARA, Ricardo Wagner de Souza. A interconexão entre mudanças climáticas e direitos fundamentais: uma abordagem interdisciplinar para mitigação e adaptação aos eventos extremos. **Research, Society And Development**, [S.L.], v. 13, n. 7, p. 1-8, 27 jun. 2024. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v13i7.46159>.

MASHOUDI, Ayoub Al *et al.* Trend analysis of heavy rainfall in the Western Rif: a statistical approach using the mann-kendall test. **Acta Geophysica**, [S.L.], v. 73, n. 6, p. 6127-6146, 2 ago. 2025. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11600-025-01667-6>.

MORAES, Rafael Brandão Ferreira de; GONÇALVES, Fábio Veríssimo. Comparison of the performance of estimated precipitation data via remote sensing in the Midwest

Region of Brazil. **Theoretical And Applied Climatology**, [S.L.], v. 153, n. 3-4, p. 1105-1116, 13 jun. 2023. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-023-04523-z>.

MORIASI, D. N. *et al.* Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Transactions Of The Asabe**, [S.L.], v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). <http://dx.doi.org/10.13031/2013.23153>.

MOYA, Héctor; *et al.* Impact of Future Climate Scenarios and Bias Correction Methods on the Achibueno River Basin. **Water**, [S.L.], v. 16, n. 8, p. 1138, 17 abr. 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w16081138>.

NASCIMENTO, Jéssica G. *et al.* Evaluating the Latest IMERG Products in a Subtropical Climate: the case of paraná state, brazil. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 13, n. 5, p. 906, 28 fev. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs13050906>.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models: Part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 10, n. 3, p. 282–290, 1970.

NEITSCH, S.L. *et al.* Documentação teórica da ferramenta de avaliação de solo e água: versão 2009. Laboratório de pesquisa de pastagens, solo e água – Serviço de pesquisa agrícola, Blackland Research Center – Texas AgriLife Research. Relatório técnico nº 406 do Texas Water Resources Institute, College Station, Texas. 2011, p 618.

OCAMPO-MARULANDA, Camilo *et al.* A spatiotemporal assessment of the high-resolution CHIRPS rainfall dataset in southwestern Colombia using combined principal component analysis. **Ain Shams Engineering Journal**, [S.L.], v. 13, n. 5, p. 101739, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2022.101739>.

ORTEGA, Paul Jara *et al.* Datos de precipitación en Ecuador y la Ley de Newcomb-Benford. **Revista de Climatología**, [S.L.], v. 23, p. 97-101, 24 set. 2023. Revista de Climatologia. <http://dx.doi.org/10.59427/rccli/2023/v23.97-101>.

PAEZ, Luciano Gagliardi. Spatial Restructuring In The Scale Debate Based On Decision-Making Processes On Climate Change: from global to local. **Zenodo**, [S.L.], v. 14, n. 41, p. 585-594, 31 maio 2023. Zenodo.

PAREDES-TREJO, Franklin J. *et al.* Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil. **Journal Of Arid Environments**, [S.L.], v. 139, p. 26-40, abr. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.12.009>.

PEREIRA, Rodrigo Moura *et al.* Improving GSMaP V06 precipitation products over the Upper Tocantins River basin in the Brazilian Cerrado, based on local rain-gauge network. **Theoretical And Applied Climatology**, [S.L.], v. 148, n. 3-4, p. 1249-1260, 8 mar. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-022-03985-x>.

RASERA, Júlia Boscariol *et al.* Do Gridded Weather Datasets Provide High-Quality Data for Agroclimatic Research in Citrus Production in Brazil? **Agriengineering**, [S.L.], v. 5, n. 2, p. 924-940, 18 maio 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/agriengineering5020057>.

RISCO, Eber *et al.* Validando productos de precipitación diaria estimados por sensoramiento remoto con estaciones pluviométricas en la cuenca Vilcanota, Perú. **Tecnología y Ciencias del Agua**, [S.L.], v. 16, n. 3, p. 176-229, 1 maio 2025. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. <http://dx.doi.org/10.24850/j-tyca-2025-03-05>.

ROZANTE, José Roberto *et al.* Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: technique and validation over south america. **Weather And Forecasting**, [S.L.], v. 25, n. 3, p. 885-894, 1 jun. 2010. American Meteorological Society. <http://dx.doi.org/10.1175/2010waf2222325.1>.

RUEZZENE, C. B *et al.* Preenchimento de falhas em dados de precipitação através de métodos tradicionais e por inteligência artificial. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S.L.], v.29, p.179-204, 2021. <https://doi.org/10.5380/rbclima.v29i0.75476>

SANTA-ROSA, Paulo R.A.; SCHETTINI, Carlos A.F.. Daily variability of estuary-shelf exchange at the Lagoa dos Patos's mouth. **Regional Studies In Marine Science**, [S.L.], v. 77, p. 103633, dez. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103633>.

SANTOS, Thiago Oliveira dos; ANDRADE FILHO, Valdir Soares de; FRANÇA, Rebeca dos Santos. Variabilidade E Tendência Climática Nos Municípios De Manaus (Am) E São Gabriel Da Cachoeira (AM): uma avaliação a partir dos dados de precipitação e temperatura. **Revista Geonorte**, [S.L.], v. 14, n. 43, p. 1, 11 maio 2023. Revista Geonorte. <http://dx.doi.org/10.21170/geonorte.2023.v.14.n.43.149.171>.

SANTOS-FISCHER, Cristiane Bahi dos *et al.* Paleoenvironmental insights into the Quaternary evolution of the southern Brazilian coast based on fossil and modern diatom assemblages. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, [S.L.], v. 446, p. 108-124, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.01.018>.

SAPUCCI, Camila R *et al.* Predictability of Precipitation and Intraseasonal Variability: insights from ecmwf model skill over brazil. **International Journal Of Climatology**, [S.L.], v. 45, n. 7, 11 mar. 2025. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.8820>.

SELL, Bruna Moreira. **Modelagem Hidrológica Baseada no SWAT+**: Predição de respostas hidrológicas frente a simulação de cenários de projeção climática futura. 2025. 81 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos). Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2025.

SEMA, Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura. **L030 - Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã**. Disponível em: <https://sema.rs.gov.br/l030-bh-rio-camaqua>. Acesso em: 27 dez. 2025.

SOROOSHIAN, Soroosh *et al.* Evaluation of PERSIANN System Satellite–Based Estimates of Tropical Rainfall. **Bulletin Of The American Meteorological Society**, [S.L.], v. 81, n. 9, p. 2035-2046, set. 2000. American Meteorological Society. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(2000\)0812.3.co;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(2000)0812.3.co;2).

SOUSA, Andreza Maciel de *et al.* Variabilidade espaço-temporal das chuvas em função de índices climáticos na mesorregião leste do Maranhão, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S.L.], v. 18, n. 3, p. 1645-1662, 2 abr. 2025. Revista Brasileira de Geografia Física. <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v18.3.p1645-1662>.

TEDESCHI, Renata G.; COLLINS, Matthew. The influence of ENSO on South American precipitation: simulation and projection in cmip5 models. **International Journal Of Climatology**, [S.L.], v. 37, n. 8, p. 3319-3339, 25 nov. 2016. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.4919>.

TORRES-MERCADO, Carlos-Enrique *et al.* Comparison of Flood Scenarios in the Cunas River Under the Influence of Climate Change. **Hydrology**, [S.L.], v. 12, n. 5, p. 117, 12 maio 2025. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/hydrology12050117>.

TRUTA NETO, José do Bonfim *et al.* Análise comparativa de algoritmos de machine learning para previsões de precipitação em séries observadas por estação

automática em Campina Grande - PB. **Contribuciones A Las Ciencias Sociales**, [S.L.], v. 16, n. 10, p. 20477-20497, 9 out. 2023. South Florida Publishing LLC. <http://dx.doi.org/10.55905/revconv.16n.10-109>.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia**: ciência e aplicação. 3. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2002.

UREÑA, Jhonatan; SAAVEDRA, Oliver. Evaluation of Satellite Based Precipitation Products at Key Basins in Bolivia. **Asia-Pacific Journal Of Atmospheric Sciences**, [S.L.], v. 56, n. 4, p. 641-655, 31 mar. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13143-020-00184-4>.

VALENCIA, J. M.; GARCÍA, C. E.; MONTERO, D.. Anomalías de vegetación asociadas con el fenómeno del ENOS en el valle geográfico del río Cauca, Colombia. **Revista de Teledetección**, [S.L.], n. 50, p. 89, 26 dez. 2017. Universitat Politècnica de Valencia. <http://dx.doi.org/10.4995/raet.2017.7715>.

VARGAS, Vanderlei *et al.* Assessing the Impact of Lightning Data Assimilation in the WRF Model. **Atmosphere**, [S.L.], v. 15, n. 7, p. 826, 10 jul. 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/atmos15070826>.

XIA, Zhengyu; BUTOROVIC, Nicolás; YU, Zicheng. The Influence of Synoptic Weather Types and Moisture Transport Pathways on Precipitation Isotopes in Southern Patagonia. **Atmosphere**, [S.L.], v. 11, n. 5, p. 514, 16 maio 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/atmos11050514>.

ZACHOW, Maximilian; NÓIA JÚNIOR, Rogério; ASSENG, Senthold. Seasonal Climate Models for National Wheat Yield Forecasts in Brazil. **Agricultural And Forest Meteorology**, [S.L.], 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4357148>.

ZHANG, Yangkai *et al.* Integrating satellite and reanalysis precipitation products for SWAT hydrological simulation in the Jing River Basin, China. **Environmental Science And Pollution Research**, [S.L.], v. 31, n. 13, p. 20534-20555, 20 fev. 2024. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-024-32482-z>.