



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA – CT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL – DECA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

LEONARDO MACIEL DE SOUSA

**DESEMPENHO DO MODELO HIDROLÓGICO SMAP NA SIMULAÇÃO DE
VAZÕES MÉDIAS MENSAIS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAPIBARIBE**

JOÃO PESSOA

2025

LEONARDO MACIEL DE SOUSA

**DESEMPENHO DO MODELO HIDROLÓGICO SMAP NA SIMULAÇÃO DE
VAZÕES MÉDIAS MENSAIS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAPIBARIBE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal da Paraíba como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel, em engenharia ambiental.

Área de concentração: Recursos Hídricos
Orientador: Prof. Dr. Gerald Norbert Souza da
Silva.

JOÃO PESSOA

2025

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S725d Sousa, Leonardo Maciel de.

Desempenho do modelo hidrológico SMAP na simulação de vazões médias mensais na bacia hidrográfica do Rio Capibaribe / Leonardo Maciel de Sousa. - João Pessoa, 2025.

106 f. : il.

Orientação: Gerald Norbert Souza da Silva.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Modelo hidrológico SMAP. 2. Bacia hidrográfica do rio Capibaribe. 3. Calibração automática. 4. Algoritmo PSO. 5. Simulação chuva-vazão. 6. Gestão de recursos hídricos. 7. HecIMS. I. Silva, Gerald Norbert Souza da. II. Título.

UFPB/CT

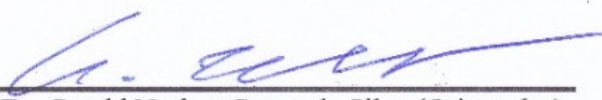
CDU 551.577.38 (043.2)

FOLHA DE APROVAÇÃO

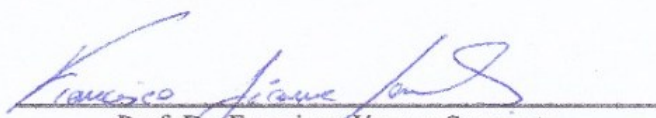
LEONARDO MACIEL DE SOUSA

DESEMPENHO DO MODELO HIDROLÓGICO SMAP NA SIMULAÇÃO DE VAZÕES MÉDIAS MENSAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAPIBARIBE

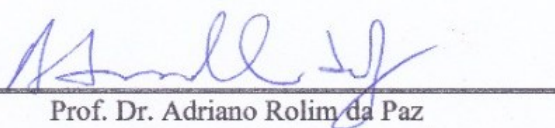
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em 20/02/2025 perante a seguinte Comissão
Julgadora:


Prof. Dr. Gerald Norbert Souza da Silva (Orientador)
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do
CT / UFPB

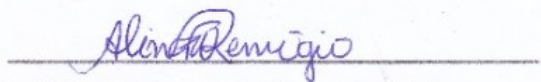
APROVADO
(Aprovado/Reprovado)


Prof. Dr. Francisco Jácome Sarmiento
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do
CT / UFPB

APROVADO
(Aprovado/Reprovado)


Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do
CT / UFPB

APROVADO
(Aprovado/Reprovado)


Prof.ª Dr.ª Aline Flavia Nunes Remigio Antunes
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e pela oportunidade de concluir esta etapa.

À minha família, pelo apoio incondicional: Minha mãe, Maria Solange Carvalho Maciel, pela dedicação e paciência em todos os momentos. Meu pai, Francisco de Assis de Sousa, pela força e incentivos constantes. Meus irmãos, Junior, Igor e Helói, pela companhia, ajuda e motivação ao longo dos anos.

Ao Professor Dr. Gerald Norbert Souza da Silva, meu orientador, agradeço a orientação e incentivo nas pesquisas realizadas que fundamentaram toda a base de conhecimentos para o desenvolvimento deste trabalho, pela orientação em projetos de iniciação científica e outros trabalhos, seus conhecimentos e disponibilidade foram fundamentais para meu crescimento acadêmico.

Ao Professor Dr. Francisco Jácome Sarmento, pela influência decisiva em minha trajetória acadêmica e profissional. Sua experiência prática na área de recursos hídricos e clareza didática despertaram em mim o interesse e entusiasmo por explorar os diversos temas desse campo do conhecimento.

À Professora Dr.^a Ana Cristina da Souza Silva, meu agradecimento pelos ensinamentos, por ter me introduzido à iniciação científica e pelas portas que isso abriu em minha trajetória.

Ao Professor Dr. Adriano Rolim da Paz, agradeço por aceitar participar da banca examinadora deste trabalho, contribuindo com suas valiosas críticas e sugestões.

Aos professores, funcionários e colegas do Laboratório de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental da Universidade Federal da Paraíba (LARHENA), pelo ambiente de aprendizado e troca de conhecimentos.

Aos amigos e colegas do curso de Engenharia Ambiental, em especial Emanuel, Antônio e Maria Clara, pela parceria nos estudos e nos momentos descontraídos que tornaram a graduação mais leve.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para este trabalho, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

A gestão sustentável dos recursos hídricos depende do conhecimento da disponibilidade hídrica em bacias hidrográficas. Nesse contexto, modelos hidrológicos, como o SMAP, são ferramentas essenciais para simular a relação chuva-vazão, permitindo a geração de séries sintéticas de vazão, ampliando as informações sobre os dados fluviométricos. O estudo teve como objetivo calibrar e avaliar o desempenho do modelo hidrológico SMAP em escala mensal, utilizando o algoritmo de otimização PSO (Particle Swarm Optimization), para simular a dinâmica fluvial da bacia hidrográfica do rio Capibaribe, localizada no Nordeste brasileiro. A pesquisa buscou analisar a capacidade do modelo em reproduzir as vazões médias mensais em dez estações fluviométricas convencionais da área de estudo. Para isso, foram utilizados dados de precipitação, evapotranspiração de referência e vazão afluente, processados por meio da plataforma web HecIMS (Hydro-Edaphoclimatic Information and Modeling System), que permitiu a delimitação das bacias e a obtenção de dados hidrometeorológicos médios mensais. O modelo SMAP foi avaliado em diferentes etapas, com destaque para a análise de longo prazo, que incluiu séries históricas mais extensas. Os resultados demonstraram que o modelo SMAP apresentou desempenho variado ao simular a dinâmica fluvial na bacia hidrográfica do rio Capibaribe. Dentre as dez estações fluviométricas analisadas, cinco se destacaram por apresentar resultados classificados como "Bons" em pelo menos duas das três métricas avaliadas. No entanto, estações como Santa Cruz do Capibaribe e Engenho Bela Rosa I apresentaram resultados insatisfatórios, indicando limitações do modelo em certas condições. Concluiu-se que o modelo SMAP mensal é uma ferramenta útil para a simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Capibaribe, mas requer ajustes e análises complementares para melhorar sua precisão. Recomenda-se a realização de análises da qualidade dos dados hidrometeorológicos, da sensibilidade dos parâmetros, da influência de intervenções antrópicas, como barramentos, e a aplicação de técnicas de validação mais robustas em futuros estudos.

Palavras-chave: Modelo hidrológico SMAP. Bacia hidrográfica do rio Capibaribe. Calibração automática. Algoritmo PSO. Simulação chuva-vazão. Gestão de recursos hídricos. HecIMS.

ABSTRACT

Sustainable water resource management relies on understanding water availability in river basins. In this context, hydrological models, such as SMAP, are essential tools for simulating rainfall-runoff relationships, enabling the generation of synthetic flow series and expanding information on streamflow data. This study aimed to calibrate and evaluate the performance of the SMAP hydrological model on a monthly scale, using the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, to simulate the fluvial dynamics of the Capibaribe River basin, located in the Brazilian Northeast. The research sought to analyze the model's ability to reproduce average monthly flows at ten conventional streamflow stations within the study area. For this purpose, precipitation data, reference evapotranspiration, and inflow discharge were processed using the web-based platform HecIMS (Hydro-Edaphoclimatic Information and Modeling System), which allowed for basin delineation and the acquisition of average monthly hydrometeorological data. The SMAP model was evaluated at different stages, with emphasis on long-term analysis, which included more extensive historical series. The results showed that the SMAP model exhibited varied performance in simulating the fluvial dynamics of the Capibaribe River basin. Among the ten streamflow stations analyzed, five stood out for presenting results classified as "Good" in at least two of the three evaluated metrics. However, stations such as Santa Cruz do Capibaribe and Engenho Bela Rosa I showed unsatisfactory results, indicating limitations of the model under certain conditions. It was concluded that the monthly SMAP model is a useful tool for hydrological simulation in the Capibaribe River basin but requires adjustments and complementary analyses to improve its accuracy. It is recommended to conduct analyses of hydrometeorological data quality, parameter sensitivity, the influence of anthropogenic interventions such as dams, and the application of more robust validation techniques in future studies.

Keywords: SMAP hydrological model. Capibaribe River basin. Automatic calibration. PSO algorithm. Rainfall-runoff simulation. Water resource management. HecIMS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do ciclo hidrológico num sistema simplificado de entradas e saídas.	17
Figura 2 – Classificação dos modelos hidrológicos a partir das características relacionadas a aleatoriedade, variabilidade espacial e temporal dos fenômenos hidrológicos.	20
Figura 3 – Atualização da posição de partículas no algoritmo PSO.....	26
Figura 4 – Exemplo de inicialização e término de uma aplicação do algoritmo PSO com valores de coeficiente de inércia (w): 0,1; 0,8 e 1,0, com processamento de 1 a 99 iterações.	26
Figura 5 – Estrutura do modelo SMAP em sua versão mensal.	30
Figura 6 – Fluxograma de funcionalidades e ferramentas do HecIMS.	34
Figura 7 – Localização da bacia hidrográfica do rio Capibaribe.....	37
Figura 8 – Fluxograma do Sistema Capibaribe.	42
Figura 9 – Localização das estações fluviométricas analisadas no estudo.....	43
Figura 10 – Gráfico da disponibilidade dos dados fluviométricos mensais por estação analisada.	46
Figura 11 – Ferramentas do painel Watershed Hydrology do aplicativo HecIMS.	49
Figura 12 – Configuração da ferramenta de definição do monitoramento em bacias hidrográficas.	53
Figura 13 – Configuração da ferramenta de caracterização do clima das bacias hidrográficas.	53
Figura 14 – Resultados da ferramenta de monitoramento do HecIMS para as estações fluviométricas do Rio Capibaribe.....	54
Figura 15 – Resultados da ferramenta de monitoramento do HecIMS para as estações do rio Goitá e rio Tapacurá.....	55
Figura 16 – Resultado da ferramenta do clima, com a configuração “Regional Vector A”, do HecIMS: Curvas Dupla Acumulativa mensal (Vetor Regional x Postos Pluviométricos) para a bacia da estação Toritama (39130000).	58
Figura 17 – Resultado da ferramenta do clima, com a configuração “Regional Vector B”, do HecIMS: Curvas Dupla Acumulativa mensal (Vetor Regional x Postos Pluviométricos) para a bacia da estação Toritama (39130000).	58
Figura 18 – Implementação em python do algoritmo do modelo SMAP mensal.	60
Figura 19 – Aplicação do algoritmo PSO em Python.....	62

Figura 20 – Representação dos meses recomendados para inicialização do modelo SMAP mensal.....	64
Figura 21 – Função objetivo empregada na calibração automática.....	66
Figura 22 – Hidrograma das séries hidrológicas utilizadas no modelo SMAP mensal: Estação São Lourenço da Mata II.	71
Figura 23 – Hidrograma da calibração do Modelo SMAP mensal: Estação São Lourenço da Mata II	72
Figura 24 – Comparação das vazões médias mensais na calibração do Modelo SMAP mensal: Estação São Lourenço da Mata II.....	73
Figura 25 – Hidrograma das séries hidrológicas utilizadas no modelo SMAP mensal: Estação Vitória de Santo Antão.....	74
Figura 26 – Hidrograma da calibração do Modelo SMAP mensal: Estação Vitória de Santo Antão.	75
Figura 27 – Comparação das vazões médias mensais na calibração do Modelo SMAP mensal: Estação Vitória de Santo Antão.	75
Figura 28 – Hidrograma das séries hidrológicas utilizadas no modelo SMAP mensal: Estação Santa Cruz do Capibaribe.	76
Figura 29 – Hidrograma da calibração do Modelo SMAP mensal: Estação Santa Cruz do Capibaribe.....	77
Figura 30 – Comparação das vazões médias mensais na calibração do Modelo SMAP mensal: Estação Santa Cruz do Capibaribe.....	78
Figura 31 – Hidrograma das séries hidrológicas utilizadas no modelo SMAP mensal: Estação Engenho Sítio.	81
Figura 32 – Hidrograma da validação do Modelo SMAP mensal: Estação Engenho Sítio.	82
Figura 33 – Comparação das vazões médias mensais na validação do Modelo SMAP mensal: Estação Engenho Sítio.....	83
Figura 34 – Hidrograma da validação do Modelo SMAP mensal: Estação Vitória de Santo Antão.	84
Figura 35 – Comparação das vazões médias mensais na validação do Modelo SMAP mensal: Estação Vitória de Santo Antão.	85
Figura 36 – Hidrograma das séries hidrológicas utilizadas no modelo SMAP mensal: Estação Toritama.....	86
Figura 37 – Hidrograma da validação do Modelo SMAP mensal: Estação Toritama.....	86

Figura 38 – Comparação das vazões médias mensais na validação do Modelo SMAP mensal: Estação Toritama.	87
Figura 39 – Hidrograma da calibração do Modelo SMAP mensal: Estação Toritama.	88
Figura 40 – Resultado geral da avaliação de desempenho do modelo SMAP mensal.	89
Figura 41 – Hidrograma de avaliação geral do Modelo SMAP mensal: Estação São Lourenço da Mata II.....	91
Figura 42 – Hidrograma de avaliação geral do Modelo SMAP mensal: Estação Engenho Canavieira.....	91
Figura 43 – Hidrograma de avaliação geral do Modelo SMAP mensal: Estação Paudalho.....	92
Figura 44 – Hidrograma de avaliação geral do Modelo SMAP mensal: Estação Salgadinho.	92
Figura 45 – Hidrograma de avaliação geral do Modelo SMAP mensal: Estação Vitória de Santo Antão.	93
Figura 46 – Hidrograma de avaliação geral do Modelo SMAP mensal: Estação Toritama.	93
Figura 47 – Hidrograma de avaliação geral do Modelo SMAP mensal: Estação Limoeiro.....	94
Figura 48 – Hidrograma de avaliação geral do Modelo SMAP mensal: Estação Santa Cruz do Capibaribe.....	95
Figura 49 – Hidrograma das séries hidrológicas utilizadas no modelo SMAP mensal: Estação Engenho Bela Rosa I.	95
Figura 50 – Hidrograma de avaliação geral do Modelo SMAP mensal: Estação Engenho Bela Rosa I.....	96
Figura 51 – Hidrograma de avaliação geral do Modelo SMAP mensal: Estação Engenho Sítio.	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limite de busca dos parâmetros do modelo SMAP na sua versão mensal.	32
Tabela 2 – Valores de referência para a constante de recessão do escoamento subterrâneo.	33
Tabela 3 - Descrição dos dados e das ferramentas de geoprocessamento disponíveis no HecIMS.	33
Tabela 4 – Principais açudes da bacia do rio Capibaribe.	38
Tabela 5 – Exemplos de vazões de referência.	41
Tabela 6 – Principais informações das estações fluviométricas selecionadas para o estudo. ..	44
Tabela 7 – Indicadores da disponibilidade dos dados fluviométricos.	45
Tabela 8 – Vazões de referência das estações fluviométricas selecionadas para o estudo.	47
Tabela 9 – Interferência dos barramentos e períodos mais indicados para a modelagem hidrológica de vazões (Se não considerada a influência do Açude Eng. Gercino Ponte (13,6 hm ³), que opera desde 1958 num afluente do rio Capibaribe, o rio Tabocas).	48
Tabela 10 – Resumo dos resultados dos processamentos da ferramenta de monitoramento do HecIMS.....	53
Tabela 11 – Resultados das médias anuais de precipitação e evapotranspiração da ferramenta que analisa o clima do HecIMS.....	59
Tabela 12 – Limites de busca na calibração automáticas dos parâmetros do Modelo SMAP mensal.....	61
Tabela 13 – Configuração utilizada no estudo do algoritmo PSO.....	62
Tabela 14 – Separação das séries de calibração e validação na aplicação do modelo SMAP mensal.....	63
Tabela 15 – Classificação qualitativa do desempenho de modelos hidrológicos.	68
Tabela 16 – Resultados da etapa de calibração do modelo SMAP mensal.	70
Tabela 17 – Resultados da etapa de validação do modelo SMAP mensal.....	80
Tabela 18 – Resultados da etapa de avaliação geral do modelo SMAP mensal.....	90

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	A BACIA HIDROGRÁFICA E O CICLO HIDROLÓGICO	16
2.2	OS MODELOS HIDROLÓGICOS.....	18
2.2.1	Definições e Aplicações	18
2.2.2	Classificação dos Modelos Hidrológicos	19
2.2.3	Modelos Hidrológicos de Transformação da Precipitação em Vazão	20
2.2.4	O Processo de Calibração e Validação de Modelos Hidrológicos.....	22
2.2.5	O Algoritmo PSO (<i>Particle Swarm Optimization</i>)	23
2.3	O MODELO SOIL MOISTURE ACCOUNTING PROCEEDURE (SMAP).....	26
2.3.1	Definições e Aplicações	26
2.3.2	Descrição do Modelo SMAP na sua Versão Mensal	29
2.4	CARACTERIZAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS ATRAVÉS DO APLICATIVO HECIMS	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	ÁREA DE ESTUDO	35
3.1.1	Localização.....	35
3.1.2	Rede Hidrográfica	35
3.1.3	Divisão Político-Administrativa.....	35
3.1.4	Clima e Relevo	36
3.1.5	Infraestrutura Hídrica de Reservatórios	36
3.2	SELEÇÃO DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS E PRIMEIRA ANÁLISE DOS DADOS	39
3.3	DEFINIÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA NA APLICAÇÃO DO MODELO SMAP MENSAL.....	49
3.3.1	A Origem dos Dados Hidrometeorológicos	49

3.3.2	Configurações do HecIMS para Determinação da Precipitação e Evapotranspiração Média Mensal em Bacias Hidrográficas.....	51
3.4	METODOLOGIAS DE APLICAÇÃO DO MODELO SMAP MENSAL	60
3.4.1	Implementação e Execução em Python do Modelo Smap Mensal	60
3.4.2	Implementação e Execução em Python do Algoritmo de Otimização PSO.....	61
3.4.3	Calibração e Validação do Modelo Smap Mensal.....	62
3.4.4	Avaliação de Desempenho do Modelo Smap Mensal	66
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	69
4.1	ANÁLISE DO DESEMPENHO DO MODELO SMAP MENSAL NA CALIBRAÇÃO	69
4.1.1	Análise da Calibração: Estação Fluviométrica São Lourenço da Mata II (39187800) 71	
4.1.2	Análise da Calibração: Estação Fluviométrica Vitória de Santo Antão (39170000)..	73
4.1.3	Análise da Calibração: Estação Fluviométrica Santa Cruz do Capibaribe (39100000) 76	
4.2	ANÁLISE DO DESEMPENHO DO MODELO SMAP MENSAL NA VALIDAÇÃO 78	
4.2.1	Análise da Validação: Estação Fluviométrica Engenho Sítio (39155000).....	81
4.2.2	Análise da Validação: Estação Fluviométrica Vitória de Santo Antão (39170000) ...	83
4.2.3	Análise da Validação: Estação Fluviométrica Toritama (39130000)	85
4.3	ANÁLISE GERAL DO DESEMPENHO DO MODELO SMAP MENSAL	88
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	98
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

1 INTRODUÇÃO

CPRM (2015) ressalta que o conhecimento da disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica constitui base essencial para a gestão sustentável dos recursos hídricos, permitindo a definição de critérios técnicos para a outorga de uso da água em atividades como geração de energia, abastecimento humano e animal, agricultura, saneamento básico e demais demandas socioeconômicas. Além disso, esses dados subsidiam decisões estratégicas no planejamento setorial, incluindo políticas públicas, desenvolvimento agropecuário e expansão da matriz energética, assegurando alocação eficiente desse recurso natural.

Segundo Almeida (2001), a carência de dados fluviométricos representa um desafio crítico para a gestão dos recursos hídricos, especialmente em bacias do Nordeste brasileiro, onde as redes fluviométricas são esparsas ou descontínuas. Em contraste, a rede pluviométrica regional apresenta maior densidade e consistência temporal, o que impõe a necessidade de recorrer a modelos matemáticos, sejam conceituais, concentrados ou distribuídos, para simular a relação chuva-vazão. Mesmo em cenários com dados fluviométricos limitados ou fragmentados, sua incorporação em estudos hidrológicos é vital para calibrar essas ferramentas e subsidiar análises sobre alocação sustentável de água.

A determinação da disponibilidade hídrica nos rios em contextos de escassez de dados tem ampliado o uso de modelos hidrológicos para gerar séries sintéticas de vazão, baseadas em informações pluviométricas e de evapotranspiração disponíveis. Métodos como a equação proposta por Aguiar (1940) são frequentemente adotados nessas situações, ainda que sua aplicação exija calibração prévia e transferência criteriosa de parâmetros entre bacias. Contudo, Diniz (2008) ressalta que essa prática só é válida quando há similaridade hidrológica comprovada entre as áreas, exigindo cautela para evitar generalizações inadequadas que comprometam a confiabilidade dos resultados.

Os modelos hidrológicos concentrados, que tratam a bacia hidrográfica como uma unidade homogênea, continuam amplamente utilizados devido à sua simplicidade paramétrica e bom desempenho após calibração com dados históricos de entrada e saída. Em contraste, os modelos distribuídos representam explicitamente a heterogeneidade espacial de processos hidrológicos, considerando variabilidade na precipitação e nas propriedades físicas do solo, vegetação e topografia. No entanto, a necessidade de calibrar parâmetros em modelos distribuídos, frequentemente inviável sem dados históricos, aumenta a complexidade do problema de estimativa de parâmetros (Beven, 2001). Como resultado, modelos concentrados,

com menores exigências de dados, são frequentemente preferidos, especialmente em contextos como a previsão de escoamento em bacias hidrográficas não monitoradas (Kling; Gupta, 2009).

Os modelos de transformação chuva-vazão oferecem ampla aplicabilidade em diferentes áreas, desde projetos de engenharia até pesquisas ambientais. Sua relevância é ainda maior em regiões não instrumentadas, onde a ausência de medições diretas de vazão exige métodos indiretos para quantificação de recursos hídricos. Conforme Otsuki e Reis (2011), a principal vantagem dessas ferramentas está na possibilidade de gerar séries de vazão sintéticas cuja extensão temporal depende dos registros pluviométricos locais, normalmente mais longos e consistentes que os fluviométricos. Essa abordagem permite superar a limitação temporal das estações de referência, reconstituindo históricos hidrológicos em locais com dados escassos ou fragmentados, o que amplia o horizonte de análises técnicas e planejamento.

A sazonalidade dos rios no Nordeste brasileiro, caracterizado pela presença de rios intermitentes, exige a construção de reservatórios para garantir o abastecimento hídrico, interceptando o fluxo natural e armazenando água durante períodos de maior disponibilidade. Nesse contexto, Paiva et al. (1999) destacam que estações fluviométricas convencionais se tornam inadequadas para calibrar modelos hidrológicos, a menos que seus métodos integrem variáveis como a dinâmica operacional dos reservatórios e o balanço hídrico da bacia.

A integração de dados fisiográficos, hidrológicos, climáticos e do solo em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) possibilita uma abordagem multidimensional para gestão dos recursos hídricos, conforme destacado por Sousa et al. (2024). Essas plataformas não apenas organizam e interpretam dados espaciais, mas também facilitam decisões embasadas. Avanços tecnológicos, como serviços web (Goodchild, 2007) e processamento em nuvem (Gorelick et al., 2017), ampliam a acessibilidade e eficiência dessas ferramentas, permitindo análises complexas em larga escala e colaboração interinstitucional em tempo real. Sousa et al. (2024) propuseram uma plataforma web, denominada *Hydro-Edaphoclimatic information and Modeling System* (HecIMS) para integração e análise dinâmica de dados hidrológicos, edáficos e climáticos no Brasil. O sistema permite simular cenários, gerar mapas temáticos e avaliar tendências temporais em bacias hidrográficas nacionais. A delimitação de bacias hidrográficas ocorre mediante seleção do exutório, ponto de drenagem final, no mapa interativo, definindo automaticamente os limites da bacia para análises subsequentes personalizadas, com potencial para subsidiar a modelagem hidrológica em bacias hidrográficas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Calibrar e avaliar o desempenho do modelo hidrológico SMAP em escala mensal, por meio do algoritmo de otimização PSO (*Particle Swarm Optimization*), utilizando dados hidrometeorológicos de precipitação, evapotranspiração de referência (ET_o) e vazão afluente observada, para as estações fluviométricas convencionais da bacia hidrográfica do rio Capibaribe. O estudo visa analisar a capacidade do modelo em simular a dinâmica fluvial da região, mediante confronto com dados de vazão observados.

1.1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Delimitar as bacias hidrográficas das estações fluviométricas utilizando o aplicativo web HecIMS.
- ✓ Determinar a precipitação e evapotranspiração de referência média mensal das bacias hidrográficas das estações fluviométricas utilizando o aplicativo web HecIMS.
- ✓ Aplicar o algoritmo PSO na calibração automática do modelo SMAP mensal.
- ✓ Analisar o desempenho do modelo SMAP mensal na etapa de calibração.
- ✓ Analisar o desempenho do modelo SMAP mensal na etapa de validação.
- ✓ Realizar a avaliação geral do desempenho do modelo SMAP mensal no estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

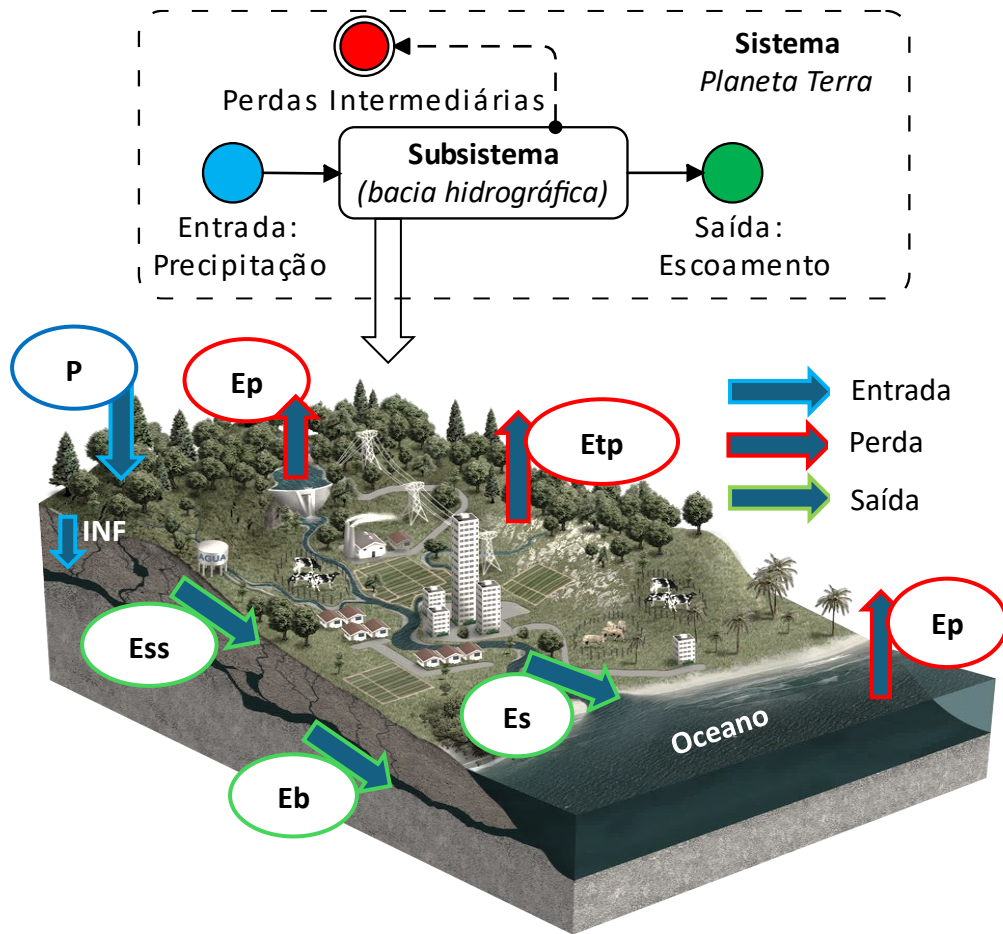
2.1 A BACIA HIDROGRÁFICA E O CICLO HIDROLÓGICO

A Lei Federal nº 9.433/97 define a bacia hidrográfica como a unidade territorial para a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), englobando instrumentos como o enquadramento dos corpos d'água, outorga e cobrança pelo uso da água (Brasil, 1997). A bacia hidrográfica é uma unidade geográfica natural usada para estudos hidrológicos, que captura e direciona escoamentos originados da precipitação para um ponto de saída, conhecido como exutório ou foz, sendo delimitada por uma linha imaginária chamada divisor de águas (Tucci, 2001; Collischonn e Dornelles, 2013). Como descreve Junior (2022), a água precipitada sobre a bacia pode seguir caminhos superficiais ou subterrâneos, dependendo das características do solo e das rochas, o divisor de águas subterrâneas geralmente coincidente com o divisor superficial, formando uma rede de drenagem composta por um rio principal e seus tributários.

Como explicado por Tucci (2001); Collischonn e Dornelles (2013), o ciclo hidrológico é um conceito central nos estudos hidrológicos, sendo impulsionado pela energia solar, que aquece o ar, o solo e a água superficial, levando à evaporação e à transpiração das plantas. O vapor de água na atmosfera, ao se condensar, forma nuvens que podem precipitar a água de volta à superfície da Terra. A precipitação que atinge o solo pode infiltrar-se, escoar em direção a regiões mais baixas (exutório ou foz), ou alimentar aquíferos subterrâneos. Em escala global, o ciclo é fechado, mas regionalmente podem existir subciclos. Contudo, como explica Chow et al. (1994), os fenômenos hidrológicos são complexos e difíceis de compreender completamente, sendo necessária uma representação simplificada por meio de modelos que relacionam entradas e saídas, desconsiderando-se os detalhes desconhecidos ou irrelevantes.

Segundo Tucci (2006) e Subramanya (2017), um sistema é composto por componentes interligados que formam um todo, e no ciclo hidrológico, como mostra a Figura 1, esses componentes ou variáveis incluem precipitação (P), infiltração (INF), evaporação (Ep), evapotranspiração (Etp), escoamento superficial (Es), subsuperficial (Ess) e subterrâneo (Eb). No contexto da bacia hidrográfica, considerada um sistema físico, a entrada é o volume de precipitação e a saída é o volume de escoamento. O processo envolve perdas intermediárias, como evaporação, transpiração das plantas e infiltração profunda, sendo que o sistema da bacia hidrográfica converte a água concentrada pela precipitação em escoamento mais distribuído ao longo do tempo.

Figura 1 – Representação do ciclo hidrológico num sistema simplificado de entradas e saídas.



Fonte: Adaptado de Tucci (2006) e Júnior (2022).

Como explica Collischonn e Dornelles (2013), o balanço hídrico de uma bacia hidrográfica reflete o equilíbrio entre as entradas e saídas de água, sendo necessário que a equação da continuidade seja atendida. A equação matemática do balanço hídrico pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = P - ETP - Q$$

Onde: ΔV é a variação do volume de água armazenado na bacia (m^3); Δt é o intervalo de tempo considerado (s); P é a precipitação (m^3/s); Q é o escoamento (m^3/s); e ETP é a evapotranspiração (m^3/s);

Na aplicação de modelos hidrológicos matemáticos, de maneira prática, o balanço hídrico das componentes hidrológicas indicadas no sistema da bacia hidrográfica, esquematizado de forma simplificada na Figura 1, pode ser formulado da seguinte forma, conforme descrito em Schwarzbach (1998):

$$P = Es + Ess + Eb + Er + \Delta R$$

Em que: P é a precipitação que entra no sistema (mm); Es é o escoamento superficial ou direto (mm); Ess é o escoamento subsuperficial (mm); Eb é o escoamento subterrâneo (mm); Er é a evapotranspiração real (mm); ΔR é a variação no armazenamento de água no sistema (mm).

2.2 OS MODELOS HIDROLÓGICOS

2.2.1 Definições e Aplicações

Para Rennó (2003), modelos são representações simplificadas de sistemas complexos, utilizados para entender processos e prever resultados, especialmente em estudos ambientais, como os que avaliam os impactos das mudanças do uso do solo e das alterações nos ecossistemas. Chow et al. (1994) afirmam que na modelagem hidrológica, o objetivo é estudar e simplificar os sistemas hidrológicos, prevendo seus resultados com base em variáveis hidrológicas mensuráveis, sendo compostos comumente por equações que relacionam entradas e saídas de um sistema. Segundo Xu (2002), um modelo destaca as componentes mais relevantes de um sistema complexo, enquanto Tucci (2005) reforça que os modelos hidrológicos ajudam a compreender e prever os processos que ocorrem em bacias hidrográficas, simulando diferentes condições e prevendo mudanças nos sistemas naturais.

Como explica Almeida (2017) e Ferreira (2021), os modelos têm sido empregados na previsão de eventos futuros que podem ser prejudiciais à sociedade, especialmente relacionados ao regime hídrico e as mudanças climáticas, auxiliando na tomada de decisão em políticas públicas. Por serem capazes de estimar condições futuras através de simulações, esses modelos se mostram ferramentas valiosas no enfrentamento de problemas ambientais, além de oferecerem alternativas para mitigar impactos.

Lou (2010) destaca algumas das principais aplicações dos modelos hidrológicos:

- **Análise de consistência e preenchimento de falhas:** Modelos hidrológicos podem ser utilizados para preencher e estender séries de vazões observadas com base no balanço hídrico e características da bacia hidrográfica, ajustando séries temporais e verificando a consistência de dados. Além disso, permitem detectar alterações nos ecossistemas e seus efeitos nos rios e bacias hidrográficas.
- **Previsão de vazão:** O processo de estimativa de vazões futuras com antecedência é crucial para o controle de cheias, operação de obras hidráulicas e navegação. A previsão

de eventos hidrológicos extremos pode ser realizada com dados da bacia hidrográfica, precipitação, vazão de postos específicos, entre outros.

- Dimensionamento e previsão de cenários de planejamento: Aplicando-se modelos integrados do clima e escoamento com estimativas da demanda hídrica futura e dos riscos associados é possível estimar as condições da disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica para diferentes cenários, apoiando o planejamento e manutenção de sistemas hídricos.
- Efeitos da modificação do uso do solo: A análise dos efeitos da mudança do uso do solo no escoamento é um desafio complexo, exigindo modelos mais sofisticados. Embora os modelos conceituais para esse tipo de análise possuam limitações, eles ainda podem fornecer uma visão qualificada das mudanças do escoamento com as variações do uso da terra.

2.2.2 Classificação dos Modelos Hidrológicos

De acordo com Chow et al. (1994), os modelos hidrológicos podem ser divididos em três categorias principais: modelos físicos, análogos e abstratos. Sendo que, os modelos abstratos descrevem matematicamente o sistema, utilizando equações que conectam as variáveis de entrada e saída, que podem depender do tempo, do espaço ou de probabilidades, como na previsão de eventos de chuva intensa, onde se calcula a probabilidade, em vez de valores exatos.

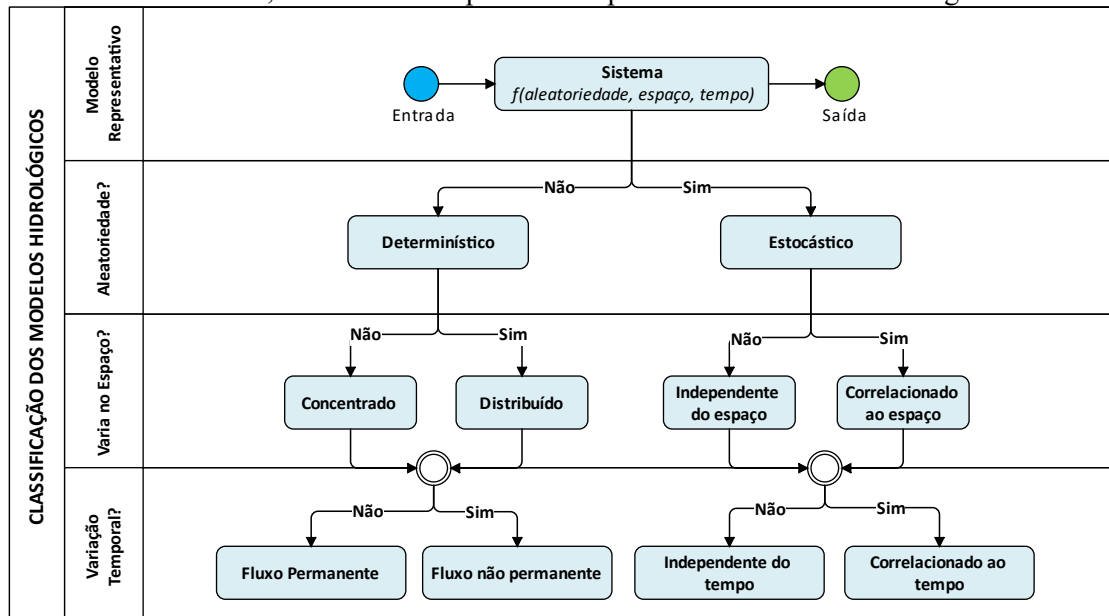
Segundo Chow et al. (1994), como mostrado na Figura 2, os modelos hidrológicos podem ser determinísticos, que geram saídas previsíveis para entradas específicas, ou estocásticos, que incorporam variabilidade aleatória e incertezas nas previsões. Além disso, eles podem ser concentrados, tratando o sistema como homogêneo, ou distribuídos, considerando a variação espacial das variáveis. Em relação ao tempo, há modelos de escoamento permanente, que assumem fluxo constante, e modelos de escoamento não permanente, que permitem variação no fluxo. Lucas et al. (2009) afirmam que a classificação dos modelos também considera variáveis estocásticas ou determinísticas, a relação empírica ou conceitual entre elas, a representação dos dados como discretos ou contínuos, a presença de relações espaciais e a dependência temporal, sendo estatísticos ou dinâmicos.

Câmara et al. (2016) destacam que a simulação hidrológica na bacia hidrográfica é limitada pela heterogeneidade das características da mesma e pelos processos e variáveis envolvidos. Já Almeida (2017), descreve que nas últimas décadas, os modelos hidrológicos

evoluíram em duas direções principais: primeiramente, há os modelos que procuram representar os processos hidrológicos com maior precisão e de forma distribuída; e, em segundo lugar, modelos que tratam empiricamente a distribuição dos parâmetros em áreas extensas, essa perspectiva está relacionada com a escala de detalhe dos processos no sistema físico.

De acordo com Tucci (2005), na prática, não há modelos totalmente distribuídos, uma vez que as discretizações numéricas usadas acabam tornando o modelo teoricamente distribuído em um conjunto de modelos do tipo concentrado, mesmo que aplicados a pequenas subdivisões do espaço total.

Figura 2 – Classificação dos modelos hidrológicos a partir das características relacionadas a aleatoriedade, variabilidade espacial e temporal dos fenômenos hidrológicos.



Fonte: Adaptado de Chow et al. (1994).

2.2.3 Modelos Hidrológicos de Transformação da Precipitação em Vazão

Beven (2012) destaca que a modelagem dos processos de chuva-vazão é essencial devido à escassez dos dados hidrológicos disponíveis. Kling e Gupta (2009) observam que os modelos concentrados de chuva-vazão são amplamente adotados por serem parametrizados de maneira simplificada, além de apresentarem um bom desempenho após a calibração com dados históricos de bacias hidrográficas.

Collischonn et al. (2023) descreve que os modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão são usados para simular a conversão da precipitação em escoamento numa bacia hidrográfica. Esses modelos têm como principal objetivo utilizar os dados de precipitação e evapotranspiração para gerar uma série contínua de vazões, possibilitando uma análise do comportamento hidrológico da bacia ao longo do tempo, ajudando no planejamento e gestão dos recursos hídricos.

Rennó (2003) exemplifica que um modelo hidrológico chuva-vazão é constituído por dados, parâmetros, equações e procedimentos, divididos em quatro grupos principais:

- Variáveis de estado: Representam o estado do sistema em qualquer momento. Por exemplo, na modelagem do balanço hídrico, a variável de estado pode ser a condição ou altura da lâmina d'água nos reservatórios representativos do sistema físico real etc.
- Fluxos ou processos: Interações entre componentes do modelo, representadas por equações de transferência, como a equação da taxa de infiltração do solo, da taxa de recarga do aquífero, entre outras.
- Entradas do modelo: Fatores que afetam as componentes do modelo, mas não são afetados por eles, representados por equações chamadas de funções forçantes. Exemplos incluem a precipitação, evapotranspiração, entre outros.
- Parâmetros: Constantes matemáticas nas equações que processam as transferências que definem o comportamento do sistema no espaço e no tempo.

Schwarzbach (1998) e Pereira (2013), destacam e descrevem alguns modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão com aceitação e aplicabilidade na comunidade científica:

- SHE: Modelo físico, determinístico e distribuído, desenvolvido por Abbott et al. (1986). Simula os processos hidrológicos por meio de equações diferenciais.
- TOPMODEL: Modelo semiconceitual e semidistribuído, desenvolvido por Beven e Kirkby (1979). Utiliza um índice topográfico para determinar processos hidrológicos em sub-bacias.
- MGB – IPH: Modelo hidrológico de grandes bacias (áreas maiores que 10.000 km²), desenvolvido por Collischonn e Tucci (2001). Simula o comportamento físico dos processos hidrológicos de forma distribuída.
- SAC – SMA: Modelo conceitual, desenvolvido por Lopes et al. (1981). Transforma a chuva em vazão considerando a umidade do solo em camadas, sendo utilizado com sucesso em diferentes tipos de clima.
- SWAT: Modelo semiconceitual, semidistribuído e contínuo, desenvolvido por Arnold et al. (1998). Prediz impactos do uso do solo em grandes bacias, simulando escoamento, sedimentos, nutrientes e outros processos hídricos com base no balanço hídrico.
- MODHAC: Modelo hidrológico determinístico, conceitual e concentrado, auto-calibrável, desenvolvido por Schwarzbach (1988). Projetado para ser usado em bacias do semiárido brasileiro e de clima temperado úmido.

- CAWM: Modelo hidrológico conceitual e concentrado no espaço, desenvolvido na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Focado na regionalização de dados em bacias semiáridas, priorizando o fluxo superficial e com versões específicas para rios intermitentes e perenes.
- SMAP: Modelo conceitual, concentrado e determinístico, baseado no método do número da curva (SCS – USDA), desenvolvido por Lopes et al. (1982). Utiliza poucos parâmetros e é fácil de calibrar, sendo utilizado na simulação de séries contínuas de vazão.

2.2.4 O Processo de Calibração e Validação de Modelos Hidrológicos

Como explica Pereira (2017), por muitos anos, a calibração dos modelos hidrológicos era realizada manualmente, com base no processo de tentativa e erro, geralmente por hidrólogos experientes, que usavam seus conhecimentos sobre as características da bacia hidrográfica. A eficiência e desempenho do modelo eram avaliados visualmente, comparando a série sintética de vazões com a observada, por meio do hidrograma. Embora esse método gerasse resultados robustos, ele era demorado e cansativo, sendo considerado eficiente, mas ineficaz.

A calibração automática de modelos hidrológicos utiliza métodos matemáticos de otimização, sendo comum a minimização de uma função objetivo, que avalia o desvio entre as vazões observadas e simuladas. Esse processo envolve um algoritmo que testa diferentes combinações de parâmetros, comparando os resultados até encontrar o valor ideal da função. No entanto, é importante garantir que os parâmetros ajustados permaneçam dentro de suas faixas de variação física, pois o ajuste é puramente matemático (Pereira, 2013).

Gupta et al. (1999) afirmam que a calibração manual pode ser viável porque muitos modelos hidrológicos têm parâmetros com relação conceitual com as características da bacia hidrográfica. No entanto, o ajuste de muitos parâmetros pode gerar efeitos imprevisíveis devido à interação entre eles. O avanço dos computadores possibilitou a automação da calibração de modelos hidrológicos, beneficiada pela melhoria dos processadores e pela adoção de novos algoritmos inspirados em sistemas naturais. Sendo que, o procedimento básico da calibração com procedimentos automáticos, desde sua criação, segue os seguintes passos:

1. Escolha de um intervalo de dados para a calibração.
2. Definição inicial dos valores ou faixas estimadas para os parâmetros.
3. Execução do modelo com os parâmetros definidos.

4. Cálculo da diferença entre os resultados do modelo e os dados reais, utilizando uma função ou métrica de avaliação.
5. Utilização de um processo iterativo de otimização para determinar os valores ótimos dos parâmetros que ajustam a função de avaliação da melhor forma possível.

A validação de modelos hidrológicos tem como objetivo verificar a precisão das previsões do modelo e sua parametrização, comparando os resultados simulados com dados observados em períodos ou áreas diferentes daqueles usados na calibração. Este processo é fundamental para avaliar o desempenho e a eficácia do modelo, já que os parâmetros ajustados na calibração permanecem constantes durante a validação (Pereira, 2013).

Klemes (1986) descreve o *Split Sample Test*, onde o modelo é calibrado com dados de um período e validado com dados de outro. O modelo é considerado válido se apresentar bons resultados em ambos os períodos, mesmo quando esses são trocados. Esse processo é especialmente aplicável a séries temporais estacionárias de vazões, nas quais os parâmetros estatísticos, como média e variância, permanecem constantes ao longo do tempo, permitindo uma análise mais robusta e confiável do modelo.

A crescente complexidade dos problemas de engenharia, especialmente na gestão de recursos hídricos, tem impulsionado o uso de algoritmos evolucionários, que são métodos de otimização inspirados em processos naturais. Esses algoritmos estocásticos utilizam aleatoriedade para encontrar soluções, gerando múltiplas alternativas para problemas com vários objetivos, facilitando o equilíbrio entre critérios como custo e eficiência (Fallah-MehdiPour; Haddad; Mariño, 2011).

2.2.5 O Algoritmo PSO (*Particle Swarm Optimization*)

O PSO (*Particle Swarm Optimization*), processo de otimização por enxame de partículas, introduzido por Kennedy e Eberhart em 1995, é um método de otimização baseado no fluxo de informações. Esse algoritmo utiliza a melhor solução encontrada até o momento para guiar o processo de busca, permitindo que o PSO converja rapidamente para uma solução satisfatória. Seu funcionamento é inspirado no comportamento coletivo de espécies, como bando de pássaros, o que o torna eficiente em encontrar boas soluções em espaços de busca grandes e complexos (Gad, 2022).

O PSO é um algoritmo estocástico baseado no comportamento social de animais, como peixes e aves. Cada solução potencial é representada por uma partícula que se move pelo espaço de busca, atualizando sua posição com base nas melhores soluções já encontradas por ela e por

outras partículas. O algoritmo, ao longo de várias iterações, busca gradualmente a solução ótima. Esse método é popular devido à sua simplicidade e ao número reduzido de parâmetros a ajustar. No entanto, ele pode ter uma convergência lenta em espaços de busca de alta dimensão e, em problemas complexos, pode apresentar resultados de baixa qualidade, devido as armadilhas de ótimos locais e flutuações na velocidade das partículas (Chou, 2012).

O PSO é estocástico porque utiliza aleatoriedade controlada para explorar o espaço de busca de forma eficiente. Essa característica é essencial para resolver problemas complexos e não lineares, como a calibração de modelos hidrológicos, onde mínimos locais são comuns.

No PSO, várias partículas (M partículas) são consideradas como soluções potenciais que se movem no espaço de busca multidimensional do problema para encontrar as posições ótimas. Cada partícula é representada por uma posição e uma velocidade no espaço de busca .

1. Partículas e posição: Cada partícula tem uma posição $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{id})$ e uma velocidade $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, \dots, v_{id})$. Sendo que, cada dimensão d corresponde a um parâmetro do problema de otimização.
2. Melhor posição pessoal ($pbest$): Cada partícula tem uma memória de sua melhor posição já encontrada, que é a posição $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, \dots, p_{id})$. Esse valor é atualizado sempre que a partícula encontra uma nova posição melhor.
3. Melhor posição global ($gbest$): A melhor posição global é a posição ótima encontrada entre todas as partículas do enxame. Esse valor também é atualizado ao longo das iterações.

A velocidade de cada partícula é atualizada a cada iteração, levando-se em consideração três componentes:

- Inércia: O termo $wv_{i,d}^k$ representa a continuidade do movimento da partícula, ou seja, sua tendência de continuar se movendo na direção anterior.
- Aceleração pessoal: $c_1rand_1(p_{i,d} - x_{i,d}^k)$ reflete a atração da partícula pela sua própria melhor posição encontrada.
- Aceleração social: $c_2rand_2(g_d^{best} - x_{i,d}^k)$ reflete a atração da partícula pela melhor posição global encontrada pelo grupo.

A fórmula clássica proposta por Kennedy e Eberhart (1995) para atualizar a velocidade da partícula i na dimensão d na iteração k é dada por:

$$v_{i,d}^{k+1} = wv_{i,d}^k + c_1rand_1(p_{i,d} - x_{i,d}^k) + c_2rand_2(g_d^{best} - x_{i,d}^k)$$

A posição da partícula é atualizada com base na velocidade calculada, ou seja, a nova posição é a posição anterior somada à velocidade atualizada:

$$x_{i,d}^{k+1} = x_{i,d}^k + v_{i,d}^{k+1}$$

Sendo que, os componentes da equação da velocidade podem ser descritos como:

- w = Coeficiente de inércia que controla a influência do movimento anterior da partícula. Ele permite balancear a exploração (movimento mais aleatório) e a exploração direcionada (movimento mais direcionado).
- c_1 e c_2 = Coeficientes de aceleração que controlam a importância da memória individual ($pbest$) e da memória global ($gbest$).
- $rand_1$ e $rand_2$ = Números aleatórios gerados para introduzir variabilidade no movimento das partículas, entre 0 e 1, ajudando a explorar diferentes áreas do espaço de busca.

Cada parâmetro atua como um "botão de ajuste" entre a exploração de novas áreas ou o refinamento das soluções já encontradas pelas partículas. Valores extremos podem levar a comportamentos indesejados, como estagnação ou divergência.

De acordo com Chou (2012), o procedimento de execução do algoritmo PSO descrito por Kennedy e Eberhart (1995) segue as seguintes etapas:

1. As partículas são inicializadas aleatoriamente, com posições e velocidades no espaço multidimensional, como mostra a Figura 4, na primeira linha.
2. A performance de cada partícula é avaliada, geralmente definida como a soma dos quadrados das diferenças entre a saída estimada e a saída observada, ou por outra função objetivo de preferência.
3. A performance atual de cada partícula é comparada com a melhor que ela já encontrou ($pbest$) e com a melhor performance encontrada pelo grupo ($gbest$). A velocidade das partículas é então atualizada com base nessas melhores posições, como mostra a Figura 3.
4. Se uma partícula encontrar um resultado melhor que a do grupo, o valor global do melhor resultado ($gbest$) é atualizado.
5. As novas velocidades e posições das partículas são calculadas para a próxima iteração com base nas equações descritas anteriormente como $v_{i,d}^{k+1}$ e $x_{i,d}^{k+1}$.
6. O processo é repetido até que a condição de término seja atendida, geralmente quando o número máximo de iterações é alcançado, como mostra a Figura 4, na segunda linha.

Figura 3 – Atualização da posição de partículas no algoritmo PSO.

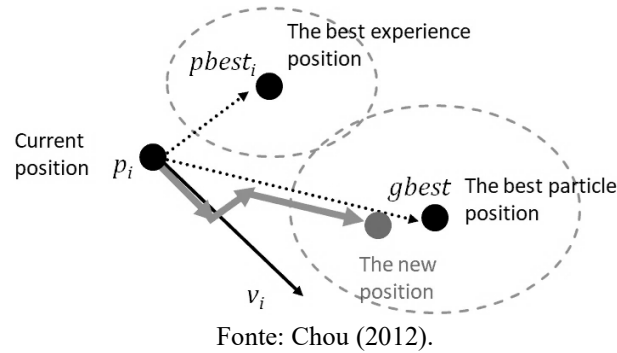
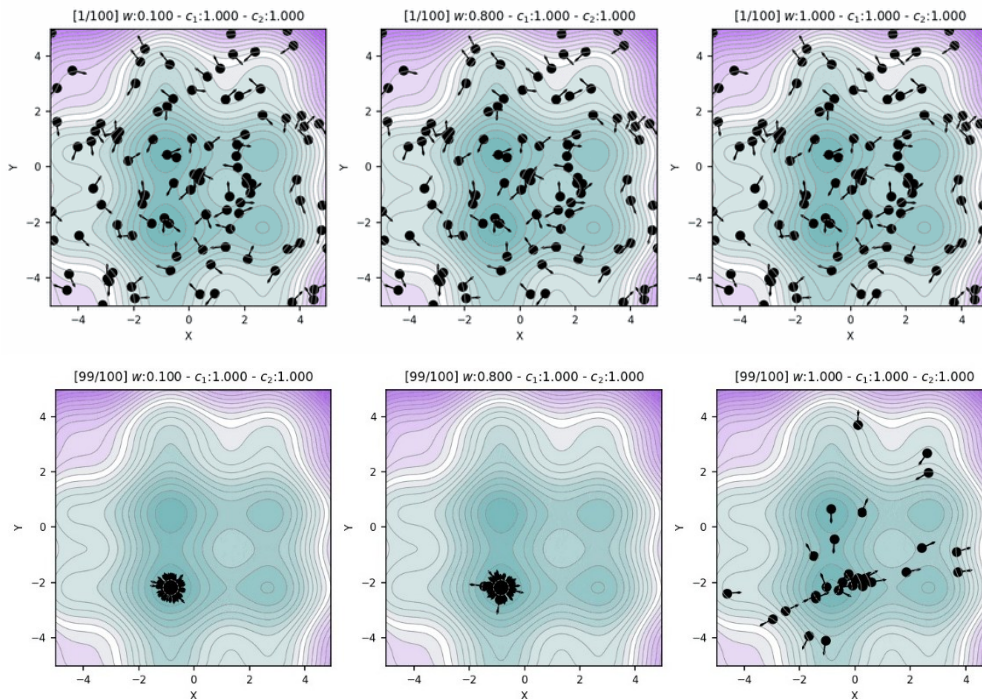


Figura 4 – Exemplo de inicialização e término de uma aplicação do algoritmo PSO com valores de coeficiente de inércia (w): 0,1; 0,8 e 1,0, com processamento de 1 a 99 iterações.



2.3 O MODELO SOIL MOISTURE ACCOUNTING PROCEEDURE (SMAP)

2.3.1 Definições e Aplicações

O modelo SMAP, desenvolvido por Lopes et al. (1982), é um modelo conceitual, determinístico e concentrado no espaço, de transformação chuva-vazão. Inicialmente projetado para intervalos diários, o modelo teve suas versões horária e mensal adaptadas ao longo do tempo. Ele é do tipo conceitual, pois se baseia nos princípios físicos do ciclo hidrológico para simular os processos naturais. A primeira apresentação do modelo ocorreu no International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling realizado em Mississippi, U.S.A.

De acordo com Lopes (1999), o SMAP foi inspirado em modelos como o Stanford Watershed IV e o Mero, com base na experiência adquirida pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE). Na versão diária, o modelo é composto por três reservatórios matemáticos: o reservatório superficial, do solo e subterrâneo, cujas variáveis de estado são atualizadas a cada dia. Os dados de entrada necessários incluem as precipitações diárias e a evapotranspiração potencial diária média.

Quando adaptado para intervalos mensais, o modelo SMAP processa o acumulado de precipitação e evapotranspiração potencial dos meses, desconsiderando o reservatório superficial, pois seu amortecimento ocorre em intervalos menores que um mês. Também é removido o conceito de capacidade de campo do solo, como explica Lopes (1999). Nessa versão, o modelo é simplificado para dois reservatórios matemáticos, cujas variáveis de estado são atualizadas uma vez por mês. Na versão diária, o modelo utiliza seis parâmetros, dos quais dois são fixos e baseados em processos físicos. Já na versão mensal, o número de parâmetros é reduzido para quatro, facilitando ainda mais sua aplicação.

O modelo SMAP opera de forma contínua, ou seja, a cada novo intervalo de tempo, são inseridos os dados de precipitação e evapotranspiração média na bacia e a água nos reservatórios é atualizada conforme as funções de transferência predefinidas. Mesmo nos períodos sem precipitação, o modelo continua a atualizar os reservatórios, levando em conta as perdas por evapotranspiração e o escoamento no exutório (Lopes et al, 1982).

A simplicidade do modelo SMAP, aliada à facilidade de calibração devido ao número reduzido de parâmetros, faz com que seja eficaz em diversos trabalhos de modelagem hidrológica. Contudo, como qualquer modelo hidrológico, o SMAP apresenta limitações e incertezas, principalmente em relação a simulação de eventos extremos raros de chuva-vazão. Sendo desenvolvido para simulação de séries contínuas de vazão e não para eventos de grande magnitude, o que pode comprometer sua performance em geral.

Algumas aplicações do modelo SMAP são apresentadas resumidamente a seguir:

- Alexandre (2005) estudou a regionalização dos parâmetros do modelo SMAP, focando em dois parâmetros da versão mensal, utilizando dados de 22 bacias hidrográficas de postos fluviométricos convencionais, no Ceará. Foram comparados três métodos de regionalização: média da série de parâmetros, regressões lineares múltiplas e árvores de regressão. O método de regressão apresentou resultados mais positivos para a regionalização dos parâmetros estudados.

- Silva (2012) aplicou o modelo SMAP diário em 123 bacias hidrográficas da Paraíba, juntamente com outros modelos chuva-vazão, o modelo MODHAC e o HBV (*Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning model*). Esse estudo revelou que o SMAP apresentou os melhores resultados tanto na calibração quanto na validação, mostrando sua boa precisão na previsão de vazões.
- Lourenço et al. (2014) utilizaram o modelo SMAP diário na bacia do rio Piancó na Paraíba e obtiveram resultados satisfatórios, com NSE superior a 80%. O desempenho foi ainda melhor, acima de 90%, no início do período de chuvas, quando os rios intermitentes recebem seus primeiros aportes de escoamento.
- Rampinelli e Costa (2015) utilizaram o modelo SMAP mensal, calibrado automaticamente com PSO e algoritmo genético, para estimar as vazões médias mensais no semiárido nordestino. Embora o modelo tenha gerado resultados favoráveis, houve distorções para as vazões máximas e mínimas.
- Silva (2015) avaliou o modelo SMAP mensal na previsão de vazões afluentes a barragem de Pedras Altas, na Bahia, com bons resultados na calibração e validação das vazões médias. Contudo, houve uma representação insatisfatória das vazões mínimas (Q90% e Q95%), evidenciando limitações para previsões de vazões extremas.
- ONS (2018) adotou oficialmente o modelo SMAP/NOS para previsão de vazões no Sistema Interligado Nacional (SIN), destacando-se pela sua simplicidade e adaptabilidade. A utilização do SMAP melhorou a previsão de vazões, sendo considerado o modelo principal devido ao seu desempenho superior e à facilidade de implementação nas bacias analisadas.
- Garcia (2022) utilizou o modelo SMAP versão mensal para simular as vazões afluentes ao reservatório Bico da Pedra, em Janaúba, em Minas Gerais. Durante a calibração, o modelo apresentou boa confiabilidade, mas foram identificadas inconsistências nos dados pluviométricos durante a validação, resultando em maiores erros nas previsões das vazões.
- Junior (2024) introduziu um modelo híbrido SMAP-XGBoost com calibração automática utilizando o algoritmo PSO, para previsão de vazões na bacia de Sobradinho, na Bahia. O modelo combinado superou o SMAP em termos de precisão, especialmente durante períodos de vazões mínimas, evidenciando o

potencial da integração entre modelos hidrológicos tradicionais e técnicas de aprendizado de máquina.

2.3.2 Descrição do Modelo SMAP na sua Versão Mensal

O modelo SMAP, em sua versão mensal é constituído de dois reservatórios matemáticos, o reservatório de água do solo (R_{SOLO}) e o reservatório de água subterrânea (R_{SUB}), ambos inicializados no primeiro mês da série de dados de entrada de precipitação (P) e evapotranspiração (Ep) mensal, sendo atualizados mensalmente até o fim da simulação, com o objetivo de calcular de forma contínua a vazão média mensal simulada (Q) na bacia hidrográfica.

Os reservatórios são processados como lâminas d'água em milímetros (mm). Os dados de entrada necessários são: as séries médias mensais de precipitação e evapotranspiração potencial, ambas em (mm), além da área da bacia hidrográfica (Ad_{BACIA}) em (km²) para conversão da vazão média mensal calculada em altura d'água (mm) em (m³/s). Na Figura 5 é possível verificar que o modelo inclui quatro funções responsáveis pela transferência de água entre os reservatórios do sistema e determinação dos escoamentos. As funções de transferências do modelo SMAP na versão mensal são:

T1: Cálculo do escoamento superficial (Es) em *mm*;

T2: Cálculo da evapotranspiração real (Er) em *mm*;

T3: Cálculo da recarga de água subterrânea (Rec) em *mm*;

T4: Cálculo do escoamento de base ou subterrâneo (Eb) em *mm*.

Para os cálculos das funções de transferências, o modelo SMAP mensal define a bacia hidrográfica como um sistema homogêneo, representado por quatro parâmetros que simulam aproximadamente a ação da bacia hidrográfica no processo de conversão da chuva em vazão, que devem ser calibrados, sendo esses:

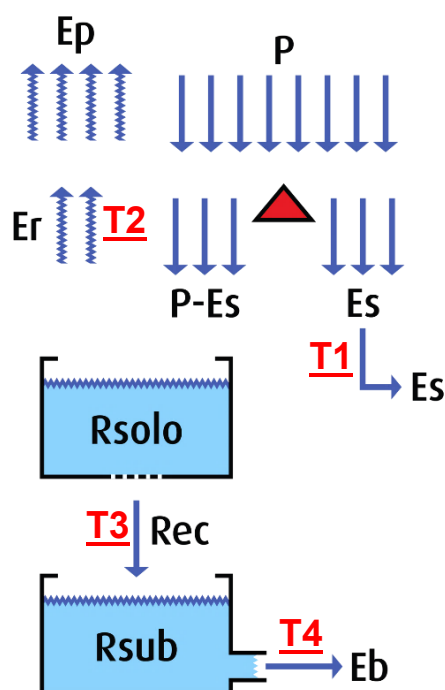
- **Str:** Representa à capacidade de saturação do solo, medida em milímetros (*mm*), definindo a quantidade máxima de água que o solo pode reter, determinando a capacidade máxima do reservatório do solo.
- **Pes:** Parâmetro adimensional que determina o escoamento superficial direto a partir das condições de umidade do solo, definindo à fração da precipitação que se transforma diretamente em escoamento.

- **Crec:** Coeficiente adimensional de recarga que determina a quantidade de água transferida do reservatório do solo para o reservatório subterrâneo, definindo o processo de percolação da água.
- **Kkt:** Constante de recessão do escoamento básico (em meses), determina a taxa com que o escoamento de base diminui ao longo do tempo. Ela indica o tempo necessário para que a vazão de base se reduza à metade do seu valor original, assumindo que não há novas recargas durante esse período.

Para realizar a inicialização dos dois reservatórios do modelo SMAP mensal, é necessário estimar o teor de umidade inicial do solo (Tu_{in}) e o escoamento de base inicial (Eb_{in}). Ambos os parâmetros são utilizados para caracterizar o estado inicial do solo e do escoamento subterrâneo, respectivamente, descritos como:

- **Tu_{in} :** Representa o teor de umidade inicial do solo, sendo calculado como uma razão entre a quantidade de água no solo (mm) e a capacidade de saturação do solo (mm), refletindo a porcentagem de saturação inicial do solo.
- **Eb_{in} :** Refere-se ao escoamento básico inicial em (m^3/s), representando o fluxo de água subterrânea que ocorre quando o reservatório subterrâneo tem sua capacidade de retenção superada.

Figura 5 – Estrutura do modelo SMAP em sua versão mensal.



Fonte: Lopes (1999) e ONS (2018).

Conforme Lopes (1999) destaca, na etapa de inicialização da simulação, é importante considerar as características climáticas e fisiográficas da bacia hidrográfica, pois isso ajuda a determinar o intervalo temporal mais adequado para calibração e validação. Em geral, o mês mais seco do ano é escolhido como o mês de inicialização, em anos de precipitação abaixo da média, nos períodos de seca. Ao final de um período de estiagem, o teor de umidade do solo e o escoamento de base estão próximos dos valores mínimos.

Além disso, dois coeficientes adimensionais são utilizados para ajustar a média pluviométrica da bacia (P_{cof}) e a média da evapotranspiração (E_{cof}), que precisam ser determinados com base na distribuição espacial das estações (Lopes, 1999).

A seguir é descrita a rotina de processamento do modelo SMAP mensal, com a etapa de inicialização e as cinco etapas de execução das funções de transferência:

- Etapa de inicialização da simulação e ajustes dos parâmetros:

$$Tu_{in} = Tu_{in}/100$$

$$C_{rec} = C_{rec}/100$$

$$kk = 0,5 \times (1/Kkt)$$

$$R_{SOLO} = Tu_{in} \times Str$$

$$R_{SUB} = E_{bin}/(1 - kk)/(Ad_{BACIA} \times 2630)$$

1. Etapa de cálculo da função de transferência do escoamento superficial (Es):

$$Tu = \frac{R_{SOLO}}{Str}$$

$$P = P \times P_{cof}$$

$$Es = Tu^{Pes} \times P$$

2. Etapa de cálculo da função de transferência da evapotranspiração real (Er):

$$Ep = Ep \times E_{cof}$$

$$Er = Tu \times Ep$$

3. Etapa de cálculo da função de transferência que define a recarga subterrânea (Rec):

$$Rec = C_{rec} \times Tu^4 \times R_{SOLO}$$

Como explica Lopes (1999), o modelo também inclui uma rotina de atualização do teor de umidade do solo, que, a cada intervalo de tempo, adiciona uma parcela da chuva mensal, utilizando o teor de umidade médio do mês. Essa abordagem melhora significativamente os resultados, especialmente em regiões com grande variabilidade no regime de precipitação.

$$Tu_{med} = (R_{SOLO} - 0,5 \times (P - Es - Er - Rec))/Str$$

$$\text{Se } Tu_{med} > 1: Tu_{med} = 1$$

$$\text{Se } Tu_{med} < 0: Tu = 0$$

Como o teor de umidade foi atualizado para o teor de umidade médio do mês, as 3 primeiras funções de transferência (Es , Er e Rec) também devem ser atualizadas, respectivamente, e na sequência é feita a atualização do reservatório do solo (R_{solo}):

$$Es = Tu_{med}^{Pes} \times P$$

$$Er = Tu_{med} \times Ep$$

$$Rec = Crec \times Tu_{med}^4 \times R_{SOLO}$$

$$R_{solo} = R_{solo} + P - Es - Er - Rec$$

$$\text{Se } R_{solo} > Str: Es = R_{solo} - Str \text{ e } R_{solo} = Str$$

4. Etapa de cálculo da função de transferência que determina o escoamento de base (Eb):

$$Eb = R_{Sub} \times (1 - kk)$$

5. Etapa da atualização do reservatório subterrâneo (R_{sub}) e de cálculo do escoamento total no exutório da bacia hidrográfica (Q) em m^3/s :

$$R_{Sub} = R_{Sub} - Eb + Rec$$

$$Q = (Es + Eb) \times Ad_{BACIA}/2630$$

Após a inicialização, as cinco etapas de cálculos são executadas iterativamente para o cálculo da vazão média mensal da bacia hidrográfica em todos os meses da simulação, a cada nova iteração, são inseridos os dados de precipitação e evapotranspiração média do mês atual e a água nos reservatórios é atualizada conforme as funções de transferência predefinidas.

Lopes (1999) utilizou calibração automática para 3 dos 4 parâmetros do modelo SMAP mensal. A Tabela 1 mostra as faixas de variação obtidas desses parâmetros a partir da análise do comportamento do modelo em variadas regiões brasileiras. A constante de recessão (Kkt) não foi sensível às funções objetivo e deve ser ajustada manualmente após o ajuste dos 3 parâmetros, observando-se o hidrograma e os trechos de recessão. A Tabela 2 relaciona essa constante ao tempo em meses e a velocidade de recessão.

Tabela 1 – Limite de busca dos parâmetros do modelo SMAP na sua versão mensal.

Parâmetro	Faixa de Variação	Unidade
Str	400 a 5000	(mm)
Pes	1 a 10	(ad.)
Crec	0 a 70	(%)
Kkt	1 a 6	(meses)

Fonte: Lopes (1999).

Tabela 2 –Valores de referência para a constante de recessão do escoamento subterrâneo.

Parâmetro	Tempo (<i>Meses</i>)	Valor da constante (<i>kk</i>)	Velocidade
Kkt	1	0,5	muito rápido
	2	0,7071	rápido
	3	0,7937	médio
	4	0,8409	lento
	6	0,8909	muito lento

Fonte: Lopes (1999).

2.4 CARACTERIZAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS ATRAVÉS DO APLICATIVO HECIMS

Conforme explica Sousa et al. (2024), o HecIMS (*Hydro-Edaphoclimatic information and Modeling System*) é um aplicativo web desenvolvido com o propósito de realizar análises morfométricas, hidrológicas, climatológicas e dos solos de bacias hidrográficas do Brasil, integrando diversas funcionalidades de um SIG e ferramentas de geoprocessamento, estando disponível neste endereço: <https://hecims.netlify.app/>.

Segundo Sousa et al. (2024), o sistema HecIMS foi desenvolvido utilizando os recursos disponibilizados no ArcGIS Server (ESRI, 2025a). Assim, sua arquitetura é baseada em uma estrutura de serviços distribuídos, onde o ArcGIS Server gerencia os dados espaciais e as análises, enquanto o front-end utiliza o ArcGIS Maps SDK for JavaScript (ESRI, 2025b) para interação dos usuários com as funcionalidades através da interface do aplicativo. As principais tecnologias utilizadas nos processamentos dos dados são a linguagem de programação Python, com as bibliotecas: *arcpy*, *pandas*, *scipy* e *numpy* (Python, 2025). Para disponibilizar as ferramentas de geoprocessamento e os dados utilizados no aplicativo, os serviços ArcGIS Server (REST) (ESRI, 2025c) são utilizados. A Tabela 3 apresenta a ordem de execução, as funcionalidades e os dados empregados na aplicação das ferramentas disponíveis neste sistema. Sendo que, as ferramentas (1) e (2) possuem abrangência continental, com serviços para América do Sul. Porém, as ferramentas (3), (4) e (5) possuem abrangência nacional, com serviços para o Brasil.

Tabela 3 - Descrição dos dados e das ferramentas de geoprocessamento disponíveis no HecIMS.

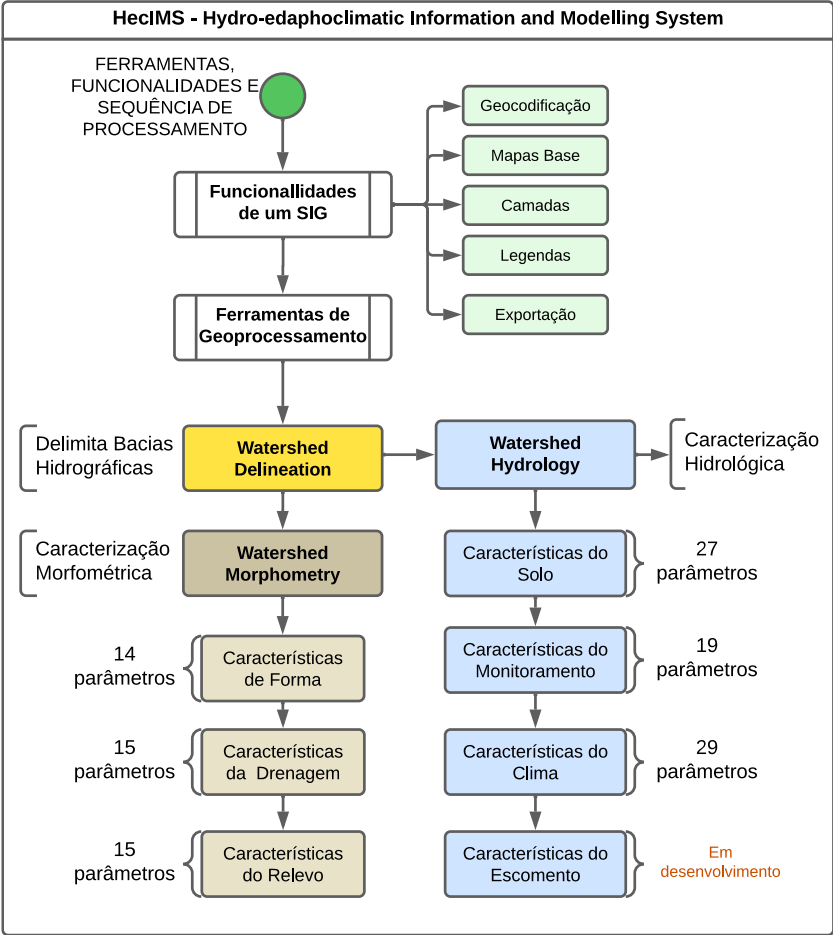
Execução	Ferramentas	Funcionalidades	Dados	Fonte dos Dados
1	Delimitação de Bacias Hidrográficas	Define Bacias Hidrográficas	HydroSHEDS v1	Hydrosheds, Lehner et al. (2008)
2	Determinação de Características Morfométricas	Determina Características de Forma, Drenagem e Relevo	HydroSHEDS v1	Hydrosheds, Lehner et al. (2008)

3	Análise do Solo	Determina a Classificação do Solo, Cobertura e Curve Number (CN)	IBGE, MapBiomass e CPRM	IBGE (2023), Souza et. al. (2020) e CPRM (2007)
4	Determinação do Monitoramento Climatológico	Determina Estações Hidrometeorológicas e Climatológicas	HIDROWEB, INMET	ANA (2025b) e INMET (2025)
5	Análise Climatológica.	Determina o Balanço Climatológico, Eventos Climáticos Extremos e IDFs	HIDROWEB, INMET	ANA (2025b) e INMET (2025)

Fonte: Adaptado de Sousa et al. (2024).

O sistema computacional na web HecIMS segue uma sequência lógica de caracterização de bacias hidrográficas por geoprocessamento, iniciando com a delimitação da área de drenagem, com a ferramenta *Watershed Delineation*, após esse processamento os usuários possuem a opção de realizar a caracterização morfométrica em *Watershed Morphometry* e/ou a caracterização hidrológica em *Watershed Hydrology*, conforme mostrado no fluxograma de processamentos do HecIMS na Figura 6.

Figura 6 – Fluxograma de funcionalidades e ferramentas do HecIMS.



Fonte: Adaptado de Sousa et al. (2024).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

As áreas analisadas neste estudo são às bacias de drenagem das estações fluviométricas convencionais localizadas na bacia hidrográfica do rio Capibaribe. A bacia hidrográfica do rio Capibaribe é a maior em área na região do Agreste Pernambucano, sendo uma Unidade de Planejamento Hídrico (UPH) estadual com extensão territorial completamente no interior dos limites administrativos do Estado de Pernambuco (PE), na região Nordeste do Brasil. Contudo, é importante destacar que nem todas as estações fluviométricas convencionais que existiram ou existem na bacia hidrográfica citada foram analisadas no presente estudo, realizou-se um processo seletivo destas explicado adiante, para definição do grupo de estações fluviométricas convencionais a ser estudado.

3.1.1 Localização

A bacia hidrográfica do rio Capibaribe localiza-se no nordeste de Pernambuco, como mostra a Figura 7, entre os paralelos sul 7°04'20" e 8°19'30" e os meridianos de longitude oeste 34°51'00" e 36°41'58". Ela faz limite ao Norte com o Estado da Paraíba e a bacia hidrográfica do rio Goiana, ao Sul com a bacia hidrográfica do rio Ipojuca, a Leste com o Oceano Atlântico e a Oeste com a Paraíba (APAC, 2025a).

3.1.2 Rede Hidrográfica

O rio Capibaribe tem sua nascente na divisa entre as cidades de Jataúba e Poção, percorrendo aproximadamente 280 km até desaguar no Recife. Sua direção inicial é sudeste-nordeste, mudando para oeste-leste próximo a Santa Cruz do Capibaribe. Ao longo de seu trajeto, serve de divisa entre diversos municípios, como Santa Cruz do Capibaribe e Brejo da Madre de Deus. Seu regime fluvial é intermitente nos trechos alto e médio, tornando-se perene a partir de Limoeiro, no baixo curso. O rio principal recebe importantes afluentes, como o riacho do Mimoso, riacho Tabocas, e rios Cotumgubá, Goitá e Tapacurá, entre outros (APAC, 2025a).

3.1.3 Divisão Político-Administrativa

A bacia hidrográfica do rio Capibaribe ocupa uma área de 7.454,88 km², representando 7,58% do estado de Pernambuco, e abrange 42 municípios. Entre os municípios totalmente inseridos na bacia estão Brejo da Madre de Deus, Chã da Alegria, Cumaru, Feira Nova, Frei Miguelinho, Glória do Goitá, Jataúba, Lagoa do Itaenga, Passira, Santa Cruz do Capibaribe,

Santa Maria do Cambucá, Surubim, Toritama, Vertentes e Vertente do Lério. Os municípios com sede na bacia são Camaragibe, Casinhas, Limoeiro, Paudalho, Pombos, Recife, Riacho das Almas, Salgadinho, São Lourenço da Mata, Taquaritinga do Norte e Vitória de Santo Antão. Já os municípios parcialmente inseridos na bacia incluem Belo Jardim, Bezerros, Bom Jardim, Carpina, Caruaru, Chã Grande, Gravatá, João Alfredo, Lagoa do Carro, Moreno, Pesqueira, Poção, Sanharó, São Caetano, Tacaimbó e Tracunhaém (APAC, 2025a).

3.1.4 Clima e Relevô

O clima no Nordeste e em Pernambuco é fortemente influenciado por fenômenos como o El Niño e o Dipolo do Atlântico, resultando em grandes variações na disponibilidade hídrica interanual. A média anual de precipitação na área da bacia hidrográfica do rio Capibaribe é de aproximadamente 1134 mm, sendo maior nas localidades próximas ao litoral. As cidades do interior próximas a cabeceira do rio Capibaribe possuem média anual pluviométrica entre 500 a 600 mm. Os postos pluviométricos de Surubim, localizado na região intermediária, e Vitória de Santo Antão, localizado mais próximo ao litoral como mostra a Figura 7, apresentaram uma média anual pluviométrica de 862 mm, enquanto no litoral, como na capital Recife, a média pluviométrica anual é por volta de 2267 mm. A temperatura média anual na área da bacia hidrográfica varia de 20,46°C a 26,14°C, e a umidade relativa do ar é de aproximadamente 73%. A evaporação anual varia entre 1500 mm e 1900 mm, e a evapotranspiração potencial calculada pelo método Hargreaves-Samani varia entre 1600 mm e 1900 mm (PROJETEC, 2010). Segundo CPRM (2015), em termos de relevo, 16,4% da bacia do rio Capibaribe possui terreno plano, enquanto 39,9% é suave ondulado, 30,9% é ondulado e 12,1% é forte ondulado, com uma pequena área montanhosa de 0,7%.

3.1.5 Infraestrutura Hídrica de Reservatórios

Os principais açudes da região incluem Jucazinho, Carpina, Tapacurá, Goitá e Poço Fundo. Além destes, destacam-se outros reservatórios como Engenho Gercino de Pontes, Várzea do Una, Oitís, Santa Luzia, Matriz da Luz, Machado e Lagoa do Porco (PROJETEC, 2010). A Tabela 4 apresenta, de forma resumida, as informações dos açudes com capacidade hídrica igual ou superior a 10 hm³, somando a capacidade máxima dos reservatórios temos 809,74 hm³. Sendo que, estes desempenham papel fundamental na disponibilidade hídrica da região. Porém, impactam e alteram o regime fluvial da bacia, uma vez que as operações de regularização das vazões interferem nos escoamentos a jusante dos barramentos.

Figura 7 – Localização da bacia hidrográfica do rio Capibaribe.

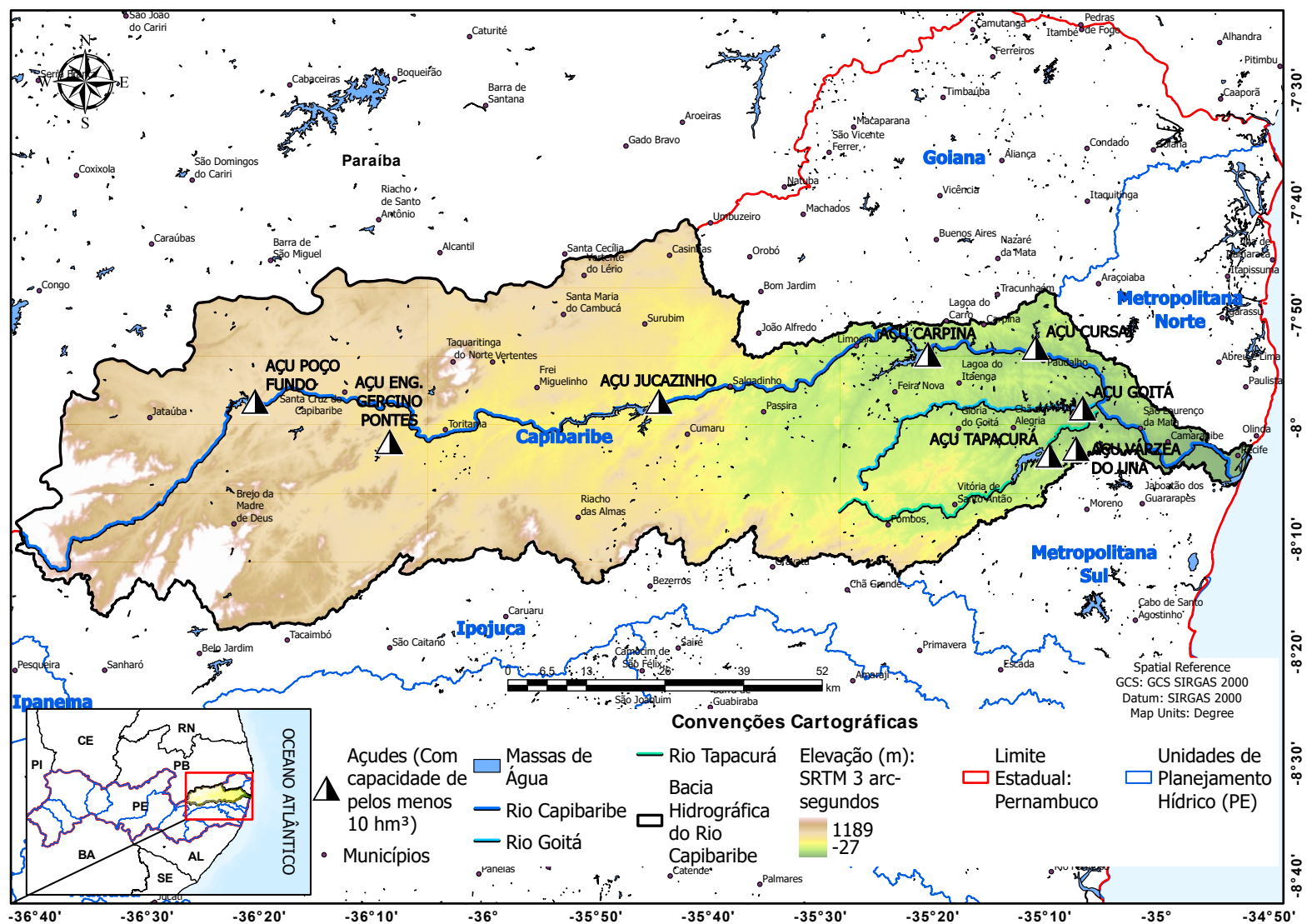


Tabela 4 – Principais açudes da bacia do rio Capibaribe.

Nome do Açude	Nome do Rio	Município	Instituição do Projeto	Ano da Construção	Uso Principal	Capacidade Máxima (hm³)	Vazão Regularizada 99% de garantia (L/s)	Latitude (Barragem)	Longitude (Barragem)
POÇO FUNDO	CAPIBARIBE	SANTA CRUZ DO CAPIBARIBE	EMOPER	1987	Abastecimento Humano	27,75	256,50	-7,96	-36,34
ENG. GERCINO PONTES	TABOCAS	CARUARU	DEPA	1958	Abastecimento Humano	13,60	295,20	-8,02	-36,14
JUCAZINHO	CAPIBARIBE	SURUBIM	DNOCS	1998	Irrigação	327,04	2972,80	-7,96	-35,74
CARPINA	CAPIBARIBE	LAGO DO CARRO	DNOCS	1992	Controle de Enchentes e Pesca	270,00	1690,50	-7,89	-35,34
CURSAÍ	CURSAÍ	PAUDALHO	COMPESA	1983	Abastecimento Humano	13,04	232,00	-7,88	-35,18
GOITÁ	GOITÁ	SÃO LOURENÇO DA MATA	DNOCS	1978	Controle de Enchentes e Pesca	52,54	862,30	-7,97	-35,11
TAPACURÁ	TAPACURÁ	SÃO LOURENÇO DA MATA	DNOCS	1978	Controle de Enchentes e Abastecimento Humano	94,20	1302,40	-8,04	-35,16
VÁRZEA DO UNA	VÁRZEA DO UNA	SÃO LOURENÇO DA MATA	COMPESA	1993	Abastecimento Humano	11,57	229,40	-8,03	-35,12

Fonte: APAC (2025b) e PROJETEC (2010).

3.2 SELEÇÃO DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS E PRIMEIRA ANÁLISE DOS DADOS

A estação fluviométrica ou posto fluviométrico convencional é um sistema utilizado para medir os níveis dos corpos hídricos, com réguas linimétricas graduadas instaladas na seção transversal do rio. Essas réguas são lidas por um observador local, duas vezes ao dia, sempre às 7 e 17 horas, e as cotas de nível são registradas em boletins fluviométricos. Além disso, a estação pode contar com equipamentos de nivelamento como níveis óticos ou digitais, que garantem a precisão na medição (ANA, 2016).

O banco de dados fluviométricos utilizado neste estudo contém diversas informações sobre as estações fluviométricas convencionais do Brasil, e é proveniente do estudo *Índices e Estatísticas Hidrometeorológicas*, elaborado e publicado por ANA (2025d). Este projeto constitui um amplo conjunto de informações relacionadas às estações fluviométricas e pluviométricas disponíveis para acesso na plataforma online HidroWeb, gerenciada pela Agência Nacional de Águas (ANA), essas informações incluem desde dados contidos no inventário de cada estação até diferentes características hidrológicas, retratadas por índices obtidos a partir dos registros históricos de vazão e precipitação.

No catálogo de metadados desse conjunto de dados estão disponíveis dois arquivos vetoriais digitais: *Estações Fluviométricas Consistido Bruto Estatísticas Brasil (.shp)* e *Estações Fluviométricas Consistido Estatísticas Brasil (.shp)*. Apenas o segundo conjunto de dados, que contém resultados fundamentados em séries fluviométricas consistidas foi utilizado no presente estudo.

Segue a apresentação, do processo em etapas, da filtragem e seleção das estações fluviométricas convencionais utilizadas neste estudo:

1. Filtragem geográfica: O arquivo vetorial *Estações Fluviométricas Consistido Estatísticas Brasil (.shp)* foi recortado para selecionar os postos georreferenciados localizados na malha do arquivo vetorial da bacia do rio Capibaribe, obtida dos dados disponibilizados no Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco (PERNAMBUCO, 2022). Sendo que, a operação de recorte foi realizada utilizando a biblioteca GeoPandas 1.0.1 do Python. Os resultados da seleção estão apresentados na Tabela 6, a distribuição espacial destas na bacia do rio Capibaribe pode ser observada no mapa da Figura 9. As estações selecionadas registram ou registraram, ao longo da história, as vazões dos cursos de 3 rios da bacia do rio Capibaribe, sendo eles o rio

- principal (Capibaribe) com 7 estações; e nos afluentes: rio Goitá e rio Tapacurá, ambos com 2 estações fluviométricas.
2. Delimitação das bacias hidrográficas: A localização da estação fluviométrica determina o exutório ou saída da sua área de drenagem, definindo um divisor de águas. As bacias hidrográficas dos postos fluviométricos foram delimitadas no aplicativo web HecIMS desenvolvido por Sousa et al. (2024), utilizando a ferramenta *Watershed Delineation*, que trabalha com dados com 90x90 metros de resolução espacial, para isso configurou-se o parâmetro *Search distance (Pour Point)*, pesquisando valores num intervalo de 150 a 1.500 metros, esses ajustes definem a distância máxima de pesquisa do exutório da bacia, considerado o ponto de maior acumulação de fluxo da rede de drenagem. Após isso, os resultados com as informações da área e perímetro das bacias foram exportados em arquivo vetorial. O valor da área de drenagem determinado pelo HecIMS e o valor presente no inventário apresentado em ANA (2025d) foram comparados, a fim de averiguar a consistência e excluir do conjunto as estações com localização e área de drenagem duvidosa. Nessa etapa, a estação denominada Açude Várzea do Una, com código identificador 39188000, e informações destacadas em vermelho na Tabela 6 foi eliminada do conjunto a ser estudado, pois apresentou inconsistências em sua localização, consequentemente na área de drenagem.
 3. Aquisição e agregação dos dados: Foi desenvolvido um script na linguagem de programação Python para processamento e requisição online na plataforma HidroWeb dos dados fluviométricos diários das estações selecionadas para estudo. Essa atividade foi realizada em 22/07/2024 com resultados armazenados em planilhas eletrônicas, esse fato é importante pois reflete os últimos registros possíveis nas séries de vazões. Os dados foram agregados para a escala de tempo mensal, considerando como mês de dados válidos apenas aqueles com pelo menos 21 dias de registros de vazão, cerca de 70% de um mês com 30 dias, os meses que não atendiam a esse critério foram considerados como sem dados ou falhos. Essa abordagem foi realizada para garantir que os dados mensais fossem representativos e suficientemente completos para as análises subsequentes, minimizando a perda de informações potencialmente úteis.
 4. Análise da disponibilidade dos dados: Foi desenvolvido um script Python para a análise da disponibilidade dos dados fluviométricos mensais válidos e não válidos (falhas) entre o primeiro e último mês de registro das séries fluviométricas, essas informações foram traduzidas em gráfico e índices estatísticos como: *anos avaliados; anos completos com*

os 12 meses de dados; anos incompletos; anos sem dados e as percentagens desses indicadores. Os resultados da etapa de verificação da disponibilidade dos dados fluviométricos mensais estão apresentados na Tabela 7 e em formato gráfico na Figura 10, o gráfico facilita a comparação e avaliação geral da situação de disponibilidade dos dados fluviométricos ao longo dos anos na bacia do rio Capibaribe.

5. Cálculo das vazões de referência: As vazões de referência foram calculadas para os dados mensais médios disponíveis de cada estação fluviométrica, bem como 2 indicadores de dispersão: o desvio-padrão e o coeficiente de variação. Conforme descrito por Collischonn et al (2023), um valor de vazão de referência pode ser interpretado como um indicador que sintetiza uma grande quantidade de dados de vazões registradas em um local específico, sendo que esta síntese representa uma característica estatística da série de dados, oferecendo informações essenciais sobre condições normais ou extremas, como as vazões durante períodos de seca ou cheias na bacia hidrográfica, a Tabela 5 mostra as vazões de referência calculadas, sendo que os resultados para o estudo estão dispostos na Tabela 8.

Tabela 5 – Exemplos de vazões de referência.

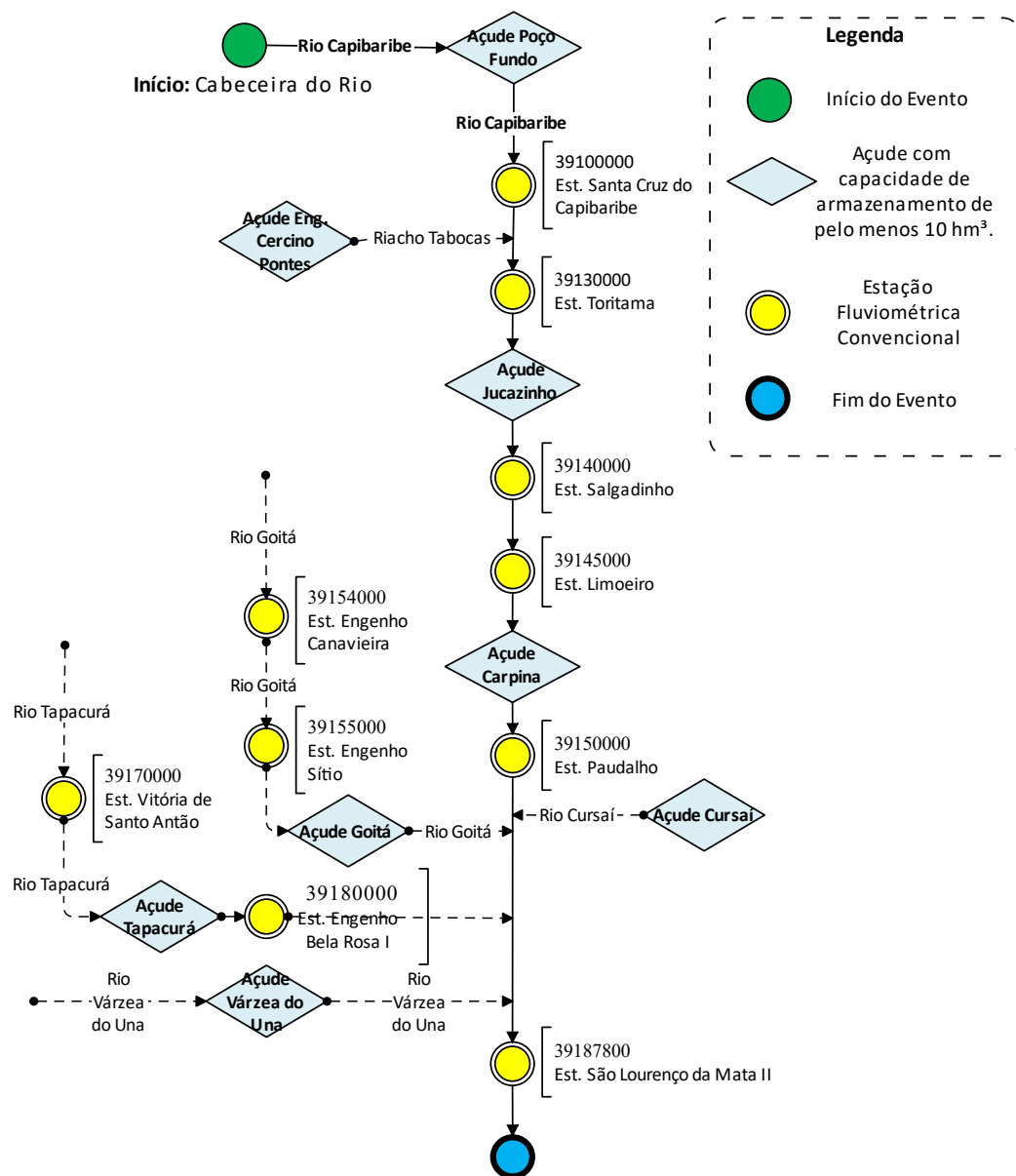
Vazão de Referência	Resumo da Descrição	Aplicação
QMLT	Vazão média de longo termo.	Vazões médias
Q90	Vazão com 90% de probabilidade de ser igualada ou superada em um mês qualquer.	Vazões mínimas
Q95	Vazão com 95% de probabilidade de ser igualada ou superada em um mês qualquer.	Vazões mínimas
QMIN	Vazão mínima de longo termo.	Vazões mínimas
Q50	Vazão com 50% de probabilidade de ser igualada ou superada em um mês qualquer (Vazão mediana).	Vazões médias
Q10	Vazão com 10% de probabilidade de ser igualada ou superada em um mês qualquer.	Vazões máximas
QMAX	Vazão máxima de longo termo.	Vazões Máximas

Fonte: Adaptado de Collischonn et al. (2023).

Para o processo de modelagem hidrológica das vazões médias mensais é importante analisar e verificar os períodos de melhor disponibilidade dos dados fluviométricos, mas não somente isso, a presença de reservatórios hídricos alterando o regime fluviométrico do rio é um fator importante a ser considerado. Os barramentos em rios possuem a capacidade de amortecer as vazões de montante e controlar o fluxo a jusante, essas características dificultam a determinação das vazões naturais da bacia hidrográfica quando há operação de reservatórios, a

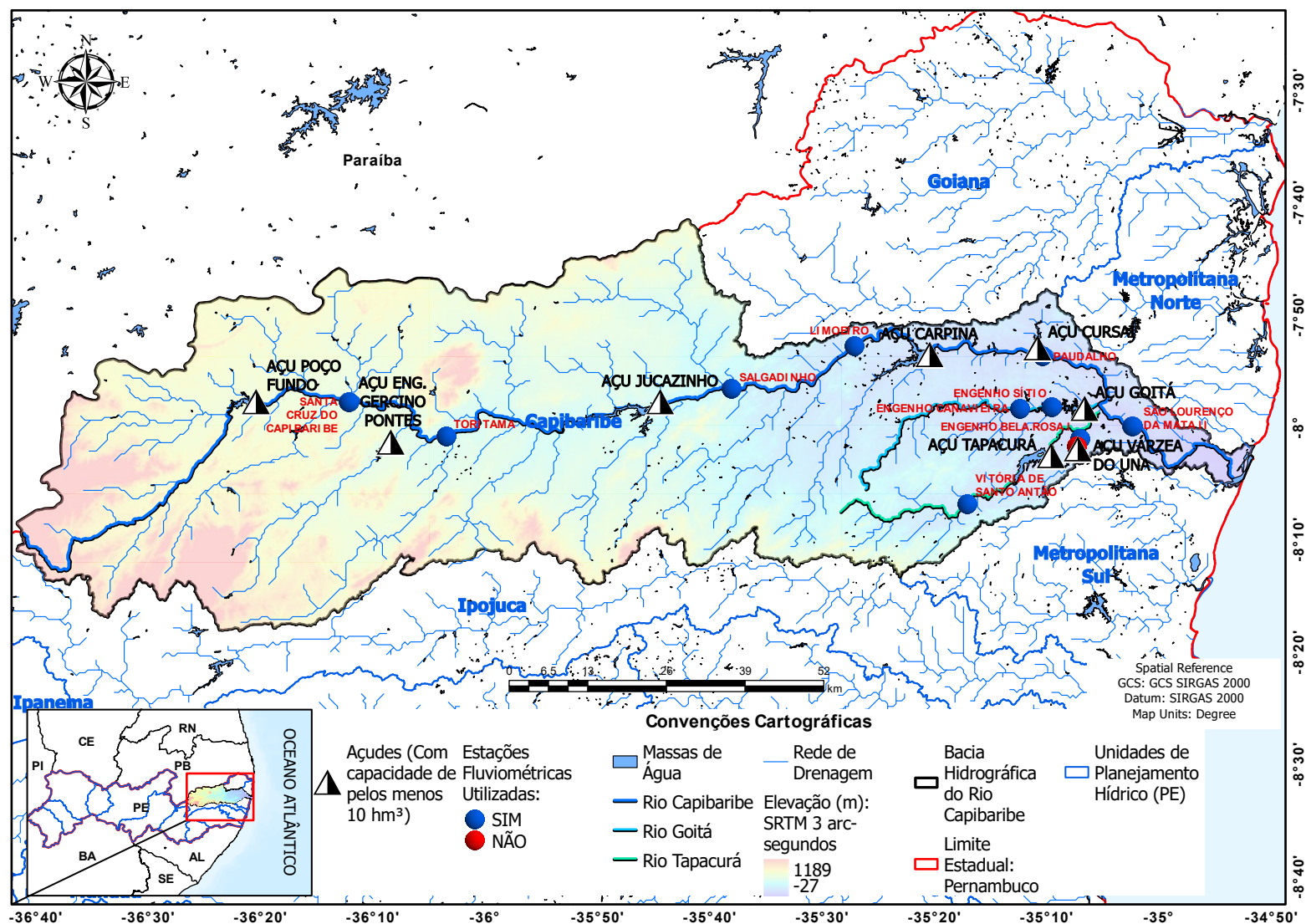
vazão natural do rio seria aquela medida na ausência de infraestruturas hidráulicas alterando o comportamento do escoamento na bacia. Para lidar com isso, realizou-se uma análise da disponibilidade dos dados fluviométricos e da data de construção dos principais açudes, com o intuito de identificar o período mais adequado para a modelagem hidrológica, período esse definido como o intervalo temporal de registros de vazões com a maior quantidade de dados e a menor interferência dos barramentos no escoamento, os resultados dessa análise para cada estação estão descritos na Tabela 9. A Figura 8 apresenta o fluxograma do sistema Capibaribe de açudes e estações fluviométricas selecionadas para o estudo.

Figura 8 – Fluxograma do Sistema Capibaribe.



Fim: Oceano Atlântico
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 9 – Localização das estações fluviométricas analisadas no estudo.



Fonte: Elaboração do Autor.

Tabela 6 – Principais informações das estações fluviométricas selecionadas para o estudo.

Código da Estação	Nome da Estação	Nome do Rio	Entidade Responsável	Entidade Operacional	Operando	Área ANA(2020) (km²)	Latitude	Longitude	Elevação (m)	Área HecIMS (km²)	Erro A1 - A2
39100000	SANTA CRUZ DO CAPIBARIBE	RIO CAPIBARIBE	ANA	CPRM	SIM	1560,00	-7,96	-36,20	437,00	1565,93	-5,93
39130000	TORITAMA	RIO CAPIBARIBE	ANA	CPRM	SIM	2450,00	-8,01	-36,06	342,00	2453,53	-3,53
39140000	SALGADINHO	RIO CAPIBARIBE	ANA	CPRM	SIM	4910,00	-7,94	-35,63	202,00	4922,38	-12,38
39145000	LIMOEIRO	RIO CAPIBARIBE	ANA	CPRM	SIM	5580,00	-7,88	-35,45	138,00	5595,04	-15,04
39188000	AÇUDE VÁRZEA DO UNA	RIO CAPIBARIBE	ANA	APAC-PE	NÃO	7290,00	-8,03	-35,12	104,00	45,32	7244,68
39150000	PAUDALHO	RIO CAPIBARIBE	ANA	CPRM	SIM	6190,00	-7,89	-35,17	72,00	6202,47	-12,47
39187800	SÃO LOURENÇO DA MATA II	RIO CAPIBARIBE	ANA	CPRM	SIM	7290,00	-8,00	-35,04	40,00	7303,08	-13,08
39154000	ENGENHO CANAVIEIRA	RIO GOITÁ	ANA	CPRM	SIM	311,00	-7,97	-35,21	80,00	312,66	-1,66
39155000	ENGENHO SÍTIO	RIO GOITÁ	ANA	ANA	NÃO	376,00	-7,97	-35,16	114,00	375,80	0,20
39170000	VITÓRIA DE SANTO ANTÃO	RIO TAPACURÁ	ANA	CPRM	SIM	264,00	-8,11	-35,28	149,00	263,44	0,56
39180000	ENGENHO BELA ROSA I	RIO TAPACURÁ	ANA	ANA	NÃO	406,00	-8,02	-35,12	73,00	458,55	-52,55

Fonte: ANA (2025) e Autor.

Tabela 7 – Indicadores da disponibilidade dos dados fluviométricos.

Avaliação da Disponibilidade	Estações Fluviométricas Analisadas na Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe									
Nome do Rio	CAPIBARIBE						GOITÁ		TAPACURÁ	
Código da Estação	39100000	39130000	39140000	39145000	39150000	39187800	39154000	39155000	39170000	39180000
Nome da Estação	SANTA CRUZ DO CAPIBARIBE	TORITAMA	SALGADINHO	LIMOEIRO	PAUDALHO	SÃO LOURENÇO DA MATA II	ENGENHO CANAVIEIRA	ENGENHO SÍTIO	VITÓRIA DE SANTO ANTÃO	ENGENHO BELA ROSA I
Mês/Ano Início da Série	05/1986	01/1973	10/1966	02/1973	08/1966	01/1990	11/1999	05/1967	04/1967	04/1967
Mês/Ano Fim da Série	06/2023	06/2023	06/2023	06/2023	06/2023	04/2023	06/2023	10/1999	12/2022	10/1993
Anos Avaliados	38	51	58	51	58	34	25	33	56	27
Anos Completos	25	41	35	42	43	29	17	17	41	16
Anos Incompletos	12	9	17	9	9	4	8	10	7	6
Anos Sem Dados	1	1	6	0	6	1	0	6	8	5
(%) de Anos Completos	65,79	80,39	60,34	82,35	74,14	85,29	68,00	51,52	73,21	59,26
(%) de Anos Incompletos	31,58	17,65	29,31	17,65	15,52	11,76	32,00	30,30	12,50	22,22
(%) de Anos Sem Dados	2,63	1,96	10,34	0,00	10,34	2,94	0,00	18,18	14,29	18,52

Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 10 – Gráfico da disponibilidade dos dados fluviométricos mensais por estação analisada.

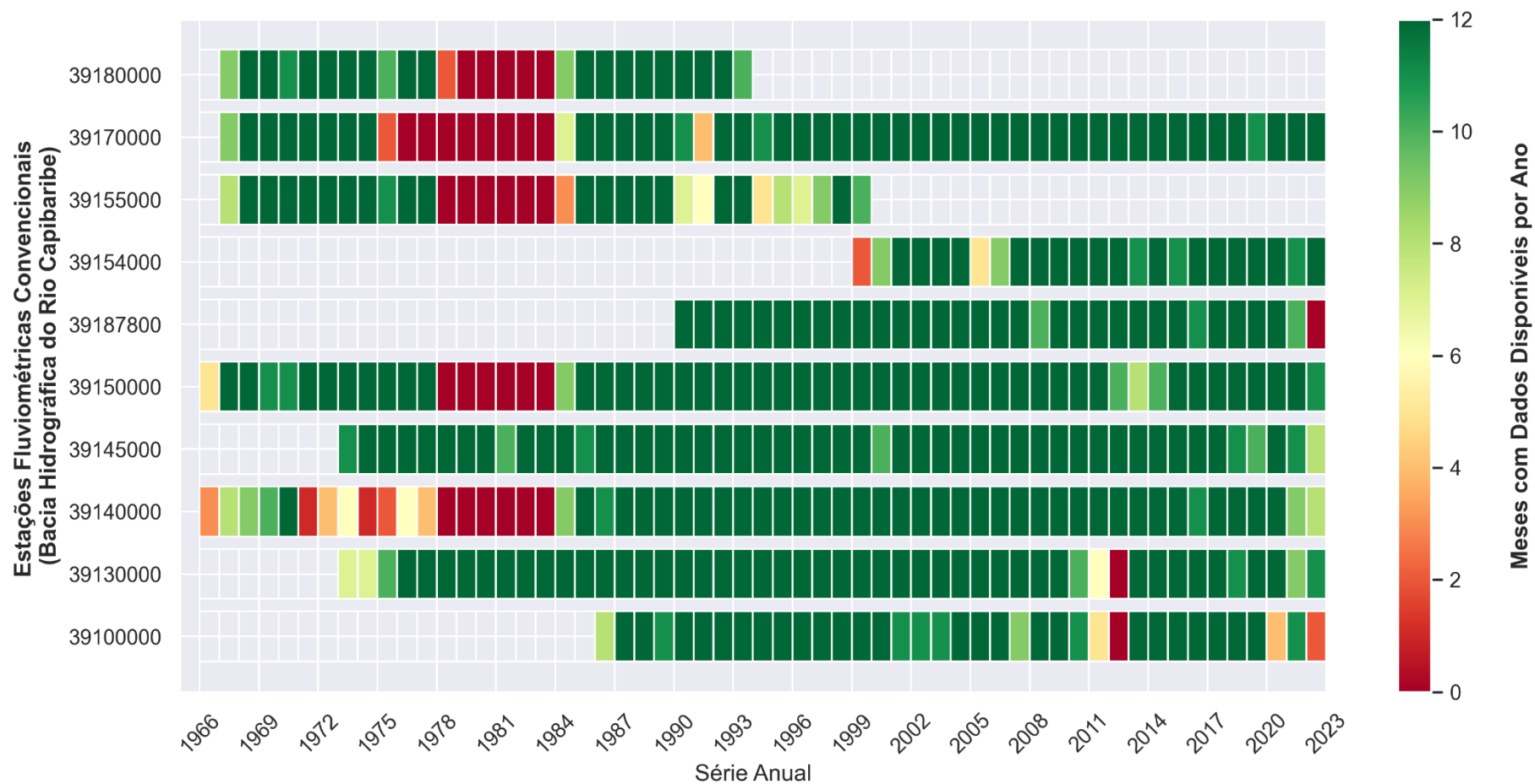


Tabela 8 – Vazões de referência das estações fluviométricas selecionadas para o estudo.

Código da Estação	Nome da Estação	Nome do Rio	Análise Temporal		Vazão Mensal (m³/s)							Dispersão	
			Início (mês/ano)	Fim (mês/ano)	Q95	Q90	Q50	Q10	QMLT	QMAX	QMIN	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
39100000	SANTA CRUZ DO CAPIBARIBE	CAPIBARIBE	05/1986	06/2023	0,00	0,00	0,00	1,31	0,80	37,16	0,00	3,17	3,98
39130000	TORITAMA		01/1973	06/2023	0,00	0,00	0,00	5,11	2,27	117,60	0,00	8,17	3,60
39140000	SALGADINHO		10/1966	06/2023	0,00	0,00	0,15	5,65	2,40	90,64	0,00	7,13	2,97
39145000	LIMOEIRO		02/1973	06/2023	0,00	0,00	0,48	12,02	4,54	147,99	0,00	13,49	2,97
39150000	PAUDALHO		08/1966	06/2023	0,00	0,05	1,63	19,03	7,27	231,49	0,00	18,10	2,49
39187800	SÃO LOURENÇO DA MATA II		01/1990	04/2023	0,00	0,08	2,27	18,20	8,23	203,03	0,00	19,82	2,41
39154000	ENGENHO CANAVIEIRA	GOITÁ	11/1999	06/2023	0,08	0,11	0,48	2,66	1,08	10,15	0,00	1,58	1,46
39155000	ENGENHO SÍTIO		05/1967	10/1999	0,30	0,40	1,68	16,87	6,36	105,82	0,00	12,67	1,99
39170000	VITÓRIA DE SANTO ANTÃO	TAPACURÁ	04/1967	12/2022	0,00	0,02	0,56	5,29	2,03	34,19	0,00	4,13	2,04
39180000	ENGENHO BELA ROSA I		04/1967	10/1993	0,10	0,12	0,73	10,90	3,69	49,75	0,02	6,52	1,77

Fonte: Elaboração do Autor.

Tabela 9 – Interferência dos barramentos e períodos mais indicados para a modelagem hidrológica de vazões (Se não considerada a influência do Açude Eng. Gercino Ponte (13,6 hm³), que opera desde 1958 num afluente do rio Capibaribe, o rio Tabocas).

Código da Estação	Nome da Estação	Nome do Rio	Registros da Estação		Barramentos a Montante (Capacidade de pelos menos 10 hm³)	Período Indicado para Modelagem Hidrológica
			Início (mês/ano)	Fim (mês/ano)		
39100000	SANTA CRUZ DO CAPIBARIBE	CAPIBARIBE	05/1986	06/2023	POÇO FUNDO	NÃO POSSUI
39130000	TORITAMA		01/1973	06/2023	POÇO FUNDO; ENG. GERCINO PONTES	1973 A 1987
39140000	SALGADINHO		10/1966	06/2023	POÇO FUNDO; ENG. GERCINO PONTES; JUCAZINHO	1966 A 1987
39145000	LIMOEIRO		02/1973	06/2023	POÇO FUNDO; ENG. GERCINO PONTES; JUCAZINHO	1973 A 1987
39150000	PAUDALHO		08/1966	06/2023	POÇO FUNDO; ENG. GERCINO PONTES; JUCAZINHO; CARPINA	1966 A 1987
39187800	SÃO LOURENÇO DA MATA II		01/1990	04/2023	TODOS OS 8 AÇUDES	NÃO POSSUI
39154000	ENGENHO CANAVIEIRA	GOITÁ	11/1999	06/2023	NÃO POSSUI	SÉRIE COMPLETA
39155000	ENGENHO SÍTIO		05/1967	10/1999	NÃO POSSUI	SÉRIE COMPLETA
39170000	VITÓRIA DE SANTO ANTÃO	TAPACURÁ	04/1967	12/2022	NÃO POSSUI	SÉRIE COMPLETA
39180000	ENGENHO BELA ROSA I		04/1967	10/1993	TAPACURÁ	1967 A 1978

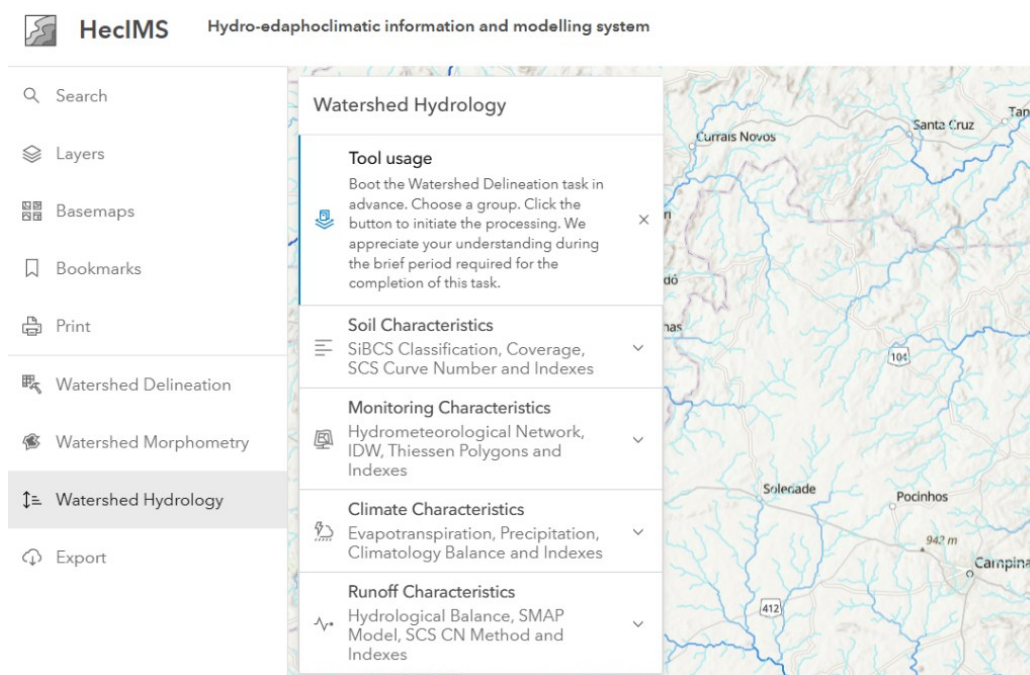
Fonte: Elaboração do Auto

3.3 DEFINIÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA NA APLICAÇÃO DO MODELO SMAP MENSAL

3.3.1 A Origem dos Dados Hidrometeorológicos

No processo de aplicação do modelo SMAP em sua versão mensal são necessários as séries mensais contínuas de precipitação e evapotranspiração potencial média da bacia hidrográfica em (mm), além do valor da sua área em (km²). Sendo que, todas essas informações foram obtidas no aplicativo web HecIMS desenvolvido por Sousa et al. (2024). As séries de precipitação e evapotranspiração de referência mensais foram obtidas na execução das ferramentas *Monitoring Characteristics* e *Climate Characteristics*, nessa sequência, disponíveis para os usuários no painel *Watershed Hydrology*, como mostrado na Figura 11, sendo necessário para essa etapa de processamento, delimitar a bacia hidrográfica anteriormente.

Figura 11 – Ferramentas do painel Watershed Hydrology do aplicativo HecIMS.



Fonte: Elaboração do Autor.

Como explica Sousa et al. (2024), os dados de precipitação processados no HecIMS são oriundos das estações pluviométricas disponibilizadas no portal HidroWeb. Sendo que, especificamente para as tarefas desse sistema, construiu-se um banco de dados de precipitação diária, da seguinte forma:

1. Realizou-se o processamento do conjunto de dados denominado *Índices e Estatísticas Hidrometeorológicas*, elaborado e publicado por ANA (2025d), com o intuito de colher as informações de inventário, sobretudo o código das estações pluviométricas presentes no arquivo vetorial: *Estacoes PLU ConsistidoBruto Estatísticas Brasil (.shp)*. Sendo que, nesse arquivo contém dados de 10.293 postos pluviométricos do Brasil.
2. Foi desenvolvido um script em Python para realizar a requisição online dos dados de precipitação diária de cada posto, através do código de identificação da estação, esses dados foram processados, organizados e armazenados em arquivos individuais do tipo (.csv) no endereço: <https://github.com/SousaLM/ANAdata/>, para serem utilizados posteriormente por requisições online nas ferramentas do aplicativo HecIMS. Sendo que, essas informações pluviométricas foram atualizadas pela última vez em 06/12/2023.

Já os dados de evapotranspiração fornecidos no HecIMS foram calculados a partir das variáveis meteorológicas registradas nas estações climatológicas operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) do Brasil. Sendo que, foi constituído um banco de dados de evapotranspiração diária especificamente para o aplicativo, da seguinte forma:

1. Realizou-se o processamento do banco de dados meteorológicos do INMET (2025), denominado INMET BDMEP, que contém informações das estações climatológicas automáticas e convencionais do Brasil, tal conjunto de dados está disponível para requisições no endereço: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Os dados das variáveis meteorológicas foram requisitados na escala de tempo diária, selecionando apenas as variáveis necessárias no processo de cálculo da evapotranspiração de referência diária pelo método Hargreaves-Samani (Hargreaves; Samani, 1985) e Penman-Monteith FAO-56 (Allen et al., 1998).
2. Foi desenvolvido um script em Python para realizar o cálculo da evapotranspiração diária pelos dois métodos citados, os resultados das estações automáticas e convencionais foram organizados e armazenados em arquivos individuais do tipo (.csv) no endereço: <https://github.com/SousaLM/INMETdata/>, para serem posteriormente utilizados por requisições online nas ferramentas do aplicativo HecIMS. Sendo que, essas informações da evapotranspiração diária foram atualizadas pela última vez em 06/12/2023.

Após a publicação do boletim 56 da FAO (Allen et al., 1998), o método Penman-Monteith/FAO foi recomendado como padrão para determinar a evapotranspiração de

referência e potencial, sendo esse empregado no presente estudo através da configuração do parâmetro *Evapotranspiration Method* na ferramenta *Climate Characteristics* do aplicativo HecIMS. Em alguns casos, a aplicação do método PM/FAO é limitada pela ausência de algumas variáveis de entrada. Para contornar isso, Allen et al. (1998) propuseram procedimentos para estimar dados climáticos ausentes, como radiação, umidade relativa e velocidade do vento. Sendo que, as equações padronizadas e a metodologia dos cálculos de todos os parâmetros da equação que determina a *ETo* são apresentadas em Allen et al. (1998). O método de Penman-Monteith da FAO para estimar a *ETo* fórmula esta equação:

$$ETo = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 U_2)}$$

Onde: *ETo* é a evapotranspiração de referência diária ($mm\ dia^{-1}$); R_n é o saldo de radiação à superfície da cultura ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$); G é a densidade do fluxo de calor do solo ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$); T é a temperatura do ar a 2 m de altura ($^{\circ}C$); U_2 é a velocidade de vento a 2 m de altura ($m\ seg^{-1}$); e_s é a pressão de vapor de saturação (kPa); e_a é a pressão parcial de vapor (kPa); Δ é a declividade da curva de pressão de vapor de saturação ($kPa/^{\circ}C$); γ é o coeficiente psicrométrico ($kPa/^{\circ}C$).

3.3.2 Configurações do HecIMS para Determinação da Precipitação e Evapotranspiração Média Mensal em Bacias Hidrográficas.

O sistema computacional HecIMS possui uma sequência de processos específicos para determinação das séries mensais contínuas de precipitação e evapotranspiração média das bacias hidrográficas delimitadas por ele, nas configurações das ferramentas *Monitoring Characteristics* e *Climate Characteristics* encontramos parâmetros a serem definidos pelos usuários. Sendo que, avaliando a disponibilidade dos dados de vazão média mensal das estações fluviométricas, optou-se por processar todos os dados hidrometeorológicos no intervalo temporal de 1965 a 2023, com o intuito de obter os dados contínuos de precipitação e evapotranspiração para as atividades de modelagem hidrológica.

Na Figura 12, visualizamos a configuração da ferramenta *Monitoring Characteristics* utilizada no estudo para definição do conjunto de estações de monitoramento das bacias hidrográficas, onde: “Nª manual weather stations” define a quantidade máxima de estações climatológicas convencionais (valor do estudo= 5); “Nª auto weather stations” define a quantidade máxima de estações climatológicas automáticas (valor do estudo= 5); “Nº rain gauge stations” determina a quantidade mínima de postos pluviométricos na área da bacia

hidrográfica (valor do estudo= 10), se esse valor mínimo não for atendido, a ferramenta expande os limites do perímetro da bacia até que essa quantidade de postos pluviométricos seja atendida; “Area buffer size” aplica uma expansão dos limites da área da bacia hidrográfica mesmo que a quantidade mínima de postos pluviométricos seja atendida, essa expansão é definida em quilômetros (km) de distância do divisor de águas da bacia hidrográfica (valor do estudo= 30 km).

A ferramenta de monitoramento oferece como resultados os polígonos de Thiessen (1911), com as áreas de influência dos postos pluviométricos e as linhas de distâncias dos pontos de localização das estações climatológicas para um ponto no centro da bacia hidrográfica, este sendo aproximadamente o centroide da área de drenagem, como mostram os resultados dos processamentos para as bacias hidrográficas na Figura 14 e Figura 15. Estes resultados do monitoramento são armazenados para serem posteriormente empregados na ferramenta de análise e modelagem do clima, que calcula a média espacial da precipitação e evapotranspiração mensal com os dados do monitoramento. A Tabela 10 apresenta os resultados do processamento da ferramenta de monitoramento do HecIMS.

Já na Figura 13, vemos a configuração da ferramenta *Climate Characteristics* utilizada no presente estudo para definição da precipitação e evapotranspiração de referência média da bacia hidrográfica, essas variáveis passam pelo mesmo processamento de agregação, preenchimento de falhas e consistência dos dados. Porém, a interpolação espacial para definição de uma única série média de dados contínuos é distinta, enquanto para a precipitação é utilizado o método de Thiessen, para a evapotranspiração é aplicado o método de interpolação inverso do quadrado da distância, a partir das seguintes equações:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i P_i}{A}$$

Onde: $\bar{P}$ é a precipitação média da bacia (mm); P_i é a precipitação no posto i (mm); A_i é a área do respectivo polígono de influência do posto, dentro da bacia (km²); A é área total da bacia (km²); n é o número total de postos pluviométricos analisados.

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i / d_i^2}{\sum_{i=1}^n 1 / d_i^2}$$

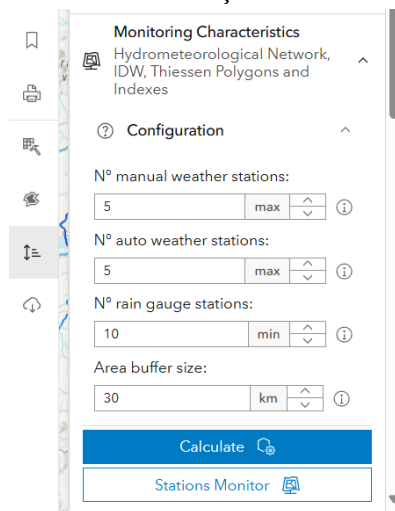
Onde: $\bar{E}$ é a evapotranspiração média de referência da bacia (mm); E_i é a evapotranspiração de referência na estação i (mm); d_i é a distância entre a estação i e o centro da bacia (km); n é o número total de estações climatológicas analisadas.

Tabela 10 – Resumo dos resultados dos processamentos da ferramenta de monitoramento do HecIMS.

Código de Identificação da Estação	Estações Localizadas na Área da Bacia	Estações Localizadas no exterior da Bacia	Postos Pluviométricos	Estações Climatológicas Convencionais	Estações Climatológicas Automáticas
39100000	18	41	48	5	5
39130000	23	45	56	5	5
39140000	39	62	88	5	5
39145000	45	70	101	5	5
39150000	51	84	120	5	5
39187800	75	83	136	5	5
39155000	4	47	40	5	5
39154000	6	54	48	5	5
39170000	6	45	40	5	5
39180000	7	52	48	5	5

Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 12 – Configuração da ferramenta de definição do monitoramento em bacias hidrográficas.



Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 13 – Configuração da ferramenta de caracterização do clima das bacias hidrográficas.

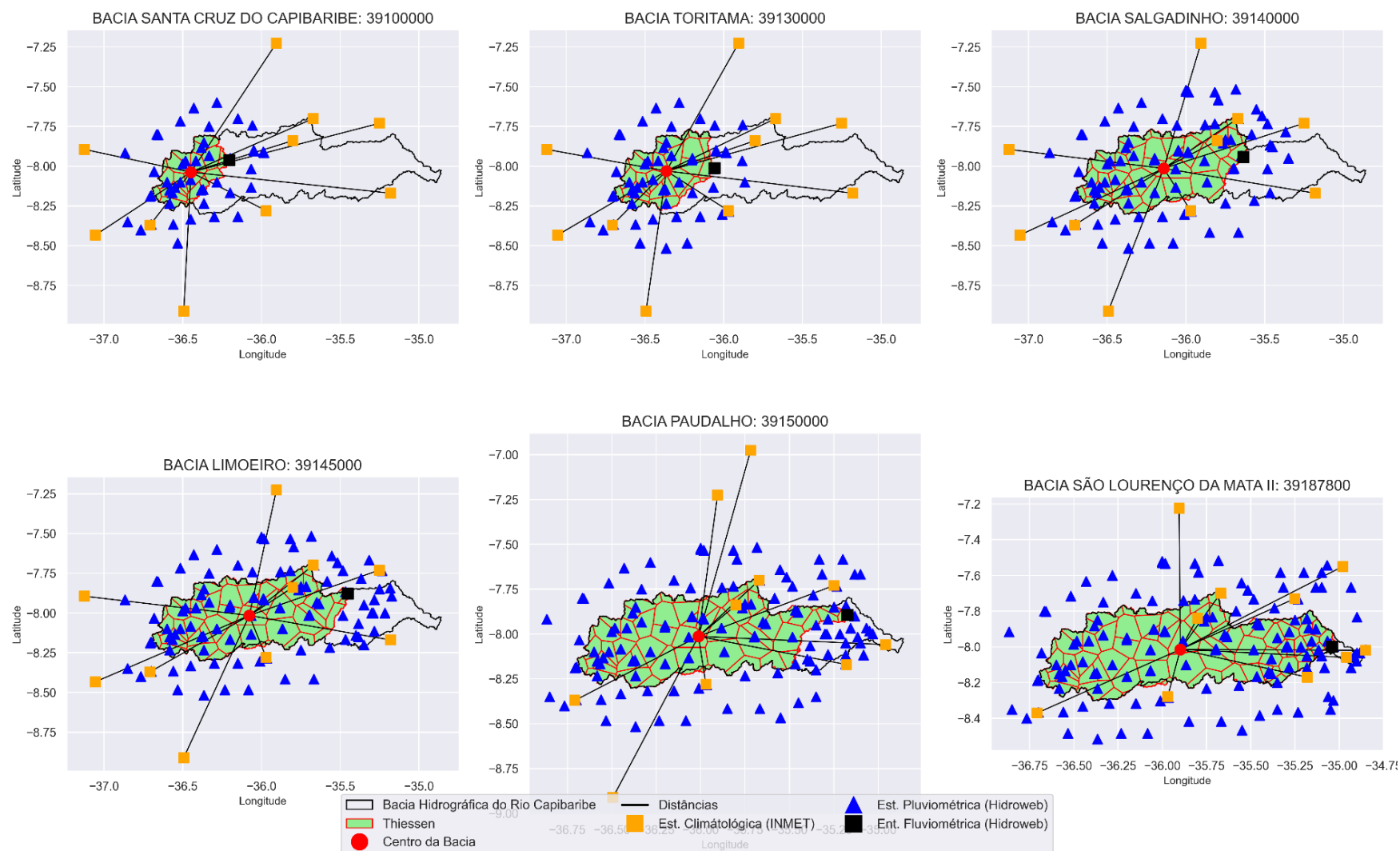
CDQC

Climate Data Quality Control (CDQC) configuration

Processing Identifiers	Help	Precipitation Data	Evapotranspiration Data
1 Minimum Number of Days for Monthly Aggregation	?	21 days	21 days
2 Minimum Amount of Monthly Data	?	60 months	60 months
3 Maximum Threshold Value of Daily Data	?	500 mm	20 mm
4 Minimum Threshold Value of Daily Data	?	0 mm	0 mm
5 Tolerance Factor for Outliers	?	0	0
6 Maximum Number of Unweighted Thiessen Stations	?	30	30
7 Maximum Number of Stations Grouped for Data Filling	?	30	30
8 Data Consistency Method	?	Regional Vector B	Regional Vector B
9 Maximum Relative Error in Vector Regional A	?	5	5
10 Maximum Relative Error in Vector Regional B	?	0.01	0.01
11 Adding Relief Weight to Final Regional Weighting	?	No	No

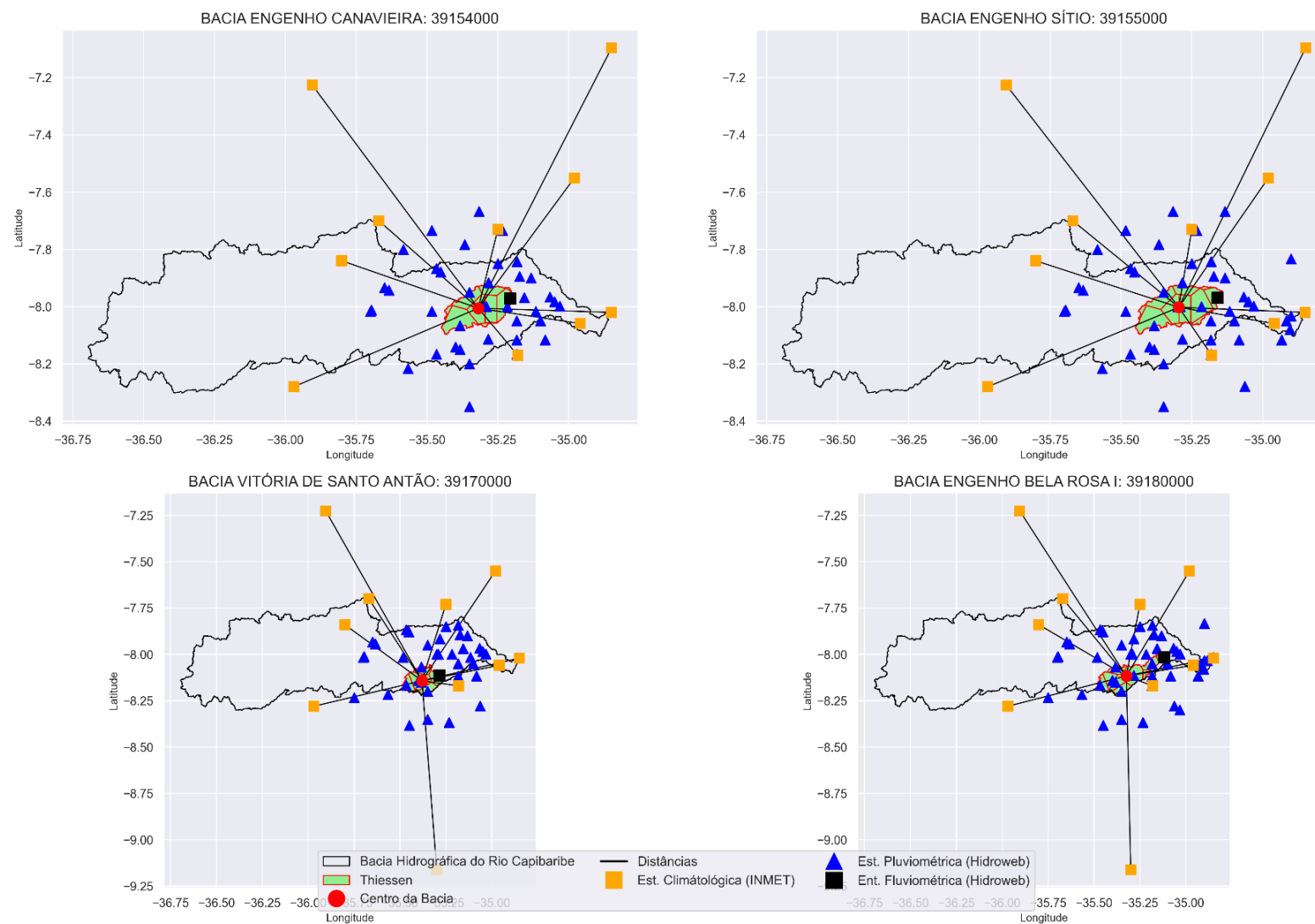
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 14 – Resultados da ferramenta de monitoramento do HecIMS para as estações fluviométricas do Rio Capibaribe.



Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 15 – Resultados da ferramenta de monitoramento do HecIMS para as estações do rio Goitá e rio Tapacurá.



Fonte: Elaboração do Autor.

O processamento de agregação, preenchimento de falhas e consistência dos dados diários de precipitação e evapotranspiração de referência realizado pela ferramenta *Climate Characteristics* do HecIMS pode ser descrito em etapas da seguinte forma:

1. Agregação dos dados: A acumulação mensal da precipitação e evapotranspiração de referência é definida pelo parâmetro “Minimum Number of Days for Monthly Aggregation”, que configura a quantidade mínima de dias com dados presentes num mês para que esse seja considerado válido (valor do estudo = 21 dias), se não é considerado mês sem dados ou falho. O parâmetro “Minimum Amount of Monthly Data” (valor do estudo= 60 meses) define a quantidade mínima de meses com dados que a série da estação deve possuir para que seja utilizada no vetor regional, se não é removida do grupo de estações e retorna apenas para o preenchimento de falhas, aplicando-se a média aritmética das 3 estações mais próximas.
2. Filtragem dos dados: A triagem de possíveis outliers ou valores discrepantes é definida pelos parâmetros “Maximum Threshold Value of Daily Data” e “Tolerance Factor for Outliers”, o primeiro configura o limite máximo dos eventos diários de precipitação e evapotranspiração de referência (valor do estudo= 500 mm para precipitação e 20 mm para evapotranspiração). Já o segundo configura o fator de multiplicação que define os limites superior e inferior do teste IQR para identificação e remoção de outliers, quando configurado como 0 (zero), esse procedimento não é aplicado e assim foi feito no estudo.
3. Preenchimento de falhas e Consistência: O preenchimento de falhas e a consistência dos dados são realizados através do método do vetor regional, desenvolvido por Hiez (1977), configurando o parâmetro “Data Consistency Method” em “Regional Vector A” ocorre o preenchimento de falhas e a substituição dos dados com base no erro relativo entre o dado estimado pelo vetor regional e os dados observados, o limite do erro é configurado em “Maximum Relative Error in Vector Regional A” (valor do estudo= 5), com mostra Figura 16. Já escolhendo “Regional Vector B”, sendo essa opção a utilizada no estudo, além do preenchimento e substituição dos dados, a correção dos dados é feita com base na declividade da reta entre o acumulado mensal da precipitação ou evapotranspiração na estação (*eixo y*) e o acumulado do vetor regional (*eixo x*), aproximadamente o método da Dupla Massas, descrito em Tucci (2001), na prática o vetor regional é multiplicado pela declividade da reta encontrada entre os dois acumulados, como mostra a Figura 17. Os parâmetros (6) e (7) da ferramenta do clima não foram aplicados no presente estudo.

O método do vetor regional, desenvolvido por Hiez (1977), é descrito por Tucci (2001) da seguinte forma: Seja A a matriz de n observações ao longo do tempo em m estações localizadas numa região considerada homogênea. O método consiste em determinar dois vetores ótimos, L e C cujo produto é uma aproximação da matriz A . O vetor L é um vetor coluna de dimensão n que recebe o nome de vetor regional, enquanto o vetor C é um vetor linha de dimensão m que representa os coeficientes característicos de cada estação. O vetor L contém índices que são únicos para toda a região e estão relacionados com as medições em cada posto por meio dos coeficientes contidos no vetor C . A estimativa da altura (mm) da precipitação ou evapotranspiração no mês i , posto j , resulta, portanto:

$$A_{ij} = L_i \times C_j$$

Para cada mês, correspondente a uma estação, existirá uma diferença entre os valores observado e estimado, de modo que é possível estabelecer uma matriz D de diferenças, cujos elementos são calculados segundo:

$$D_{ij} = A_{ij} - L_i \times C_j$$

Os elementos da matriz L e C são determinados pela minimização quadrática da matriz D . A soma dos quadrados das diferenças é:

$$FO = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m D_{ij}^2$$

Diferenciando FO com relação as incógnitas L_i e C_j e igualando cada expressão a zero, resulta em um sistema não-linear de $n + m$ equações e $n + m$ incógnitas cuja solução é:

$$C_j = \frac{\sum_i^n L_i \times C_j}{\sum_i^n L_i^2} ; j = 1, \dots, m$$

$$L_i = \frac{\sum_j^m A_{ij} \times C_j}{\sum_j^m C_j^2} ; i = 1, \dots, n$$

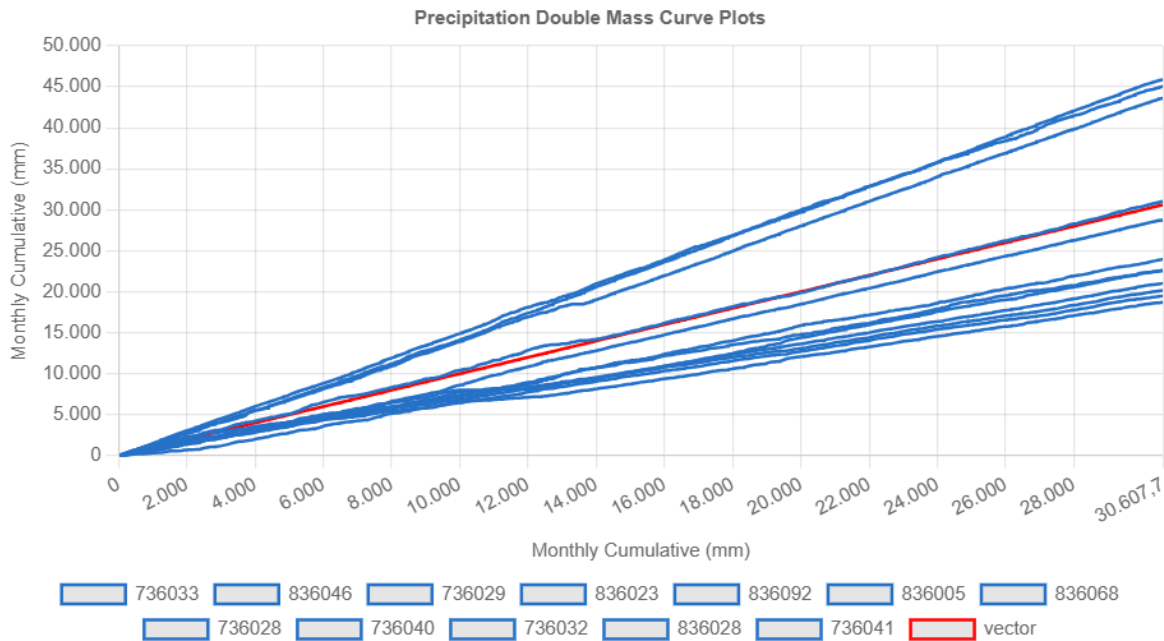
A solução do sistema pode ser alcançada mediante processo iterativo, partindo de uma estimativa inicial do vetor regional. É prática comum adotar para a estimativa inicial do i ésimo valor do vetor L a média aritmética dos dados registrados nas m estações, ou seja:

$$L_i = \frac{1}{m} \sum_j^m A_{ij}$$

Com essa estimativa inicial, resolve-se a equação que calcula C_j . Obtidos os elementos do vetor C , aplica-se o mesmo processo para recalculer os elementos do vetor L , até que o

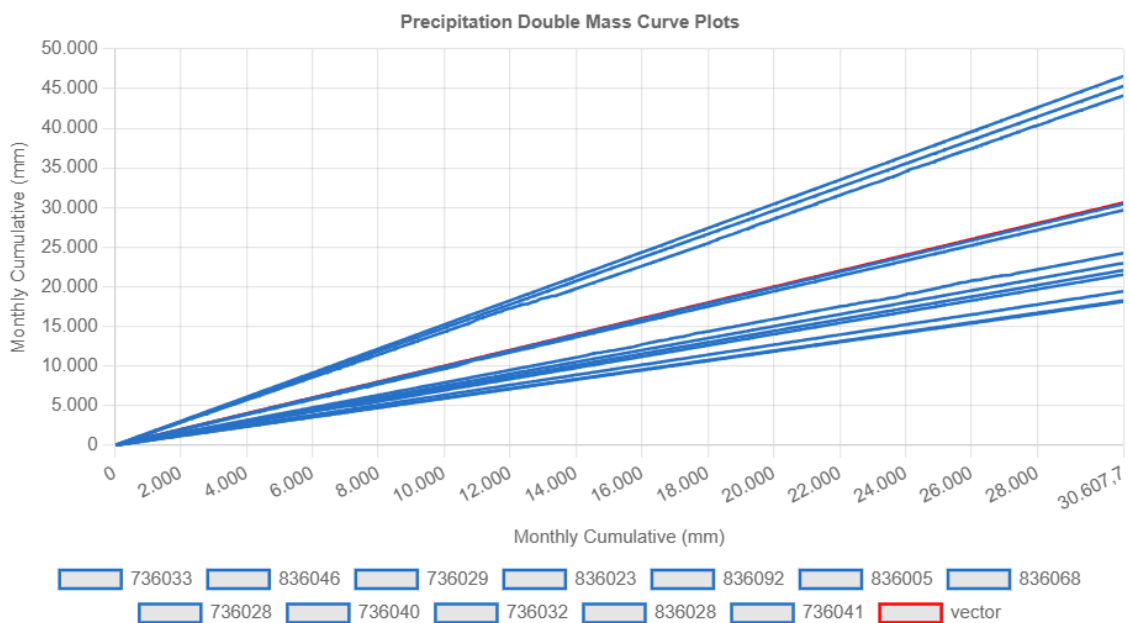
critério de parada seja obtido, considerando um valor mínimo de erro absoluto entre o vetor L_i e L_{i-1} .

Figura 16 – Resultado da ferramenta do clima, com a configuração “Regional Vector A”, do HecIMS: Curvas Dupla Acumulativa mensal (Vetor Regional x Postos Pluviométricos) para a bacia da estação Toritama (39130000).



Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 17 – Resultado da ferramenta do clima, com a configuração “Regional Vector B”, do HecIMS: Curvas Dupla Acumulativa mensal (Vetor Regional x Postos Pluviométricos) para a bacia da estação Toritama (39130000).



Fonte: Elaboração do Autor.

Como mostra a Tabela 11, A precipitação média anual (Prec) varia significativamente nas áreas de drenagem das bacias analisadas, com os maiores valores observados nas áreas das estações próximas ao litoral como Engenho Canavieira (914,96 mm), Engenho Sítio (1033,67 mm), e Engenho Bela Rosa I (919,09 mm). Enquanto as áreas das estações mais próximas da cabeceira do rio Capibaribe como Santa Cruz do Capibaribe (508,90 mm), Toritama (556,19 mm), Limoeiro (520,33) e Salgadinho (389,66 mm) apresentam os menores índices pluviométricos.

A evapotranspiração de referência anual (Evpt) é mais elevada nas estações próximas à cabeceira do rio, como Santa Cruz do Capibaribe (1627,16 mm) e Toritama (1620,02 mm), o que indica uma grande perda de água para a atmosfera e impacto na disponibilidade hídrica dessas áreas. Por outro lado, a Evpt é menor nas estações localizadas mais próximas ao litoral, como Engenho Bela Rosa I (1440,45 mm) e Vitória de Santo Antão (1480,75 mm). Contudo, essa variação não é tão grande como a que ocorre com a precipitação média anual.

Tabela 11 – Resultados das médias anuais de precipitação e evapotranspiração da ferramenta que analisa o clima do HecIMS.

Nome da Estação	Código de Identificação	Precipitação média anual (mm)	Evapotranspiração de Referência média anual (mm)
Santa Cruz do Capibaribe	39100000	508,90	1627,16
Toritama	39130000	556,19	1620,02
Salgadinho	39140000	389,66	1538,98
Limoeiro	39145000	520,33	1555,79
Paudalho	39150000	579,92	1565,13
São Lourenço da Mata II	39187800	609,02	1570,06
Engenho Canavieira	39155000	914,96	1511,14
Engenho Sítio	39154000	1033,67	1480,86
Vitória de Santo Antão	39170000	781,09	1480,75
Engenho Bela Rosa I	39180000	919,09	1440,45

Fonte: Elaboração do Autor.

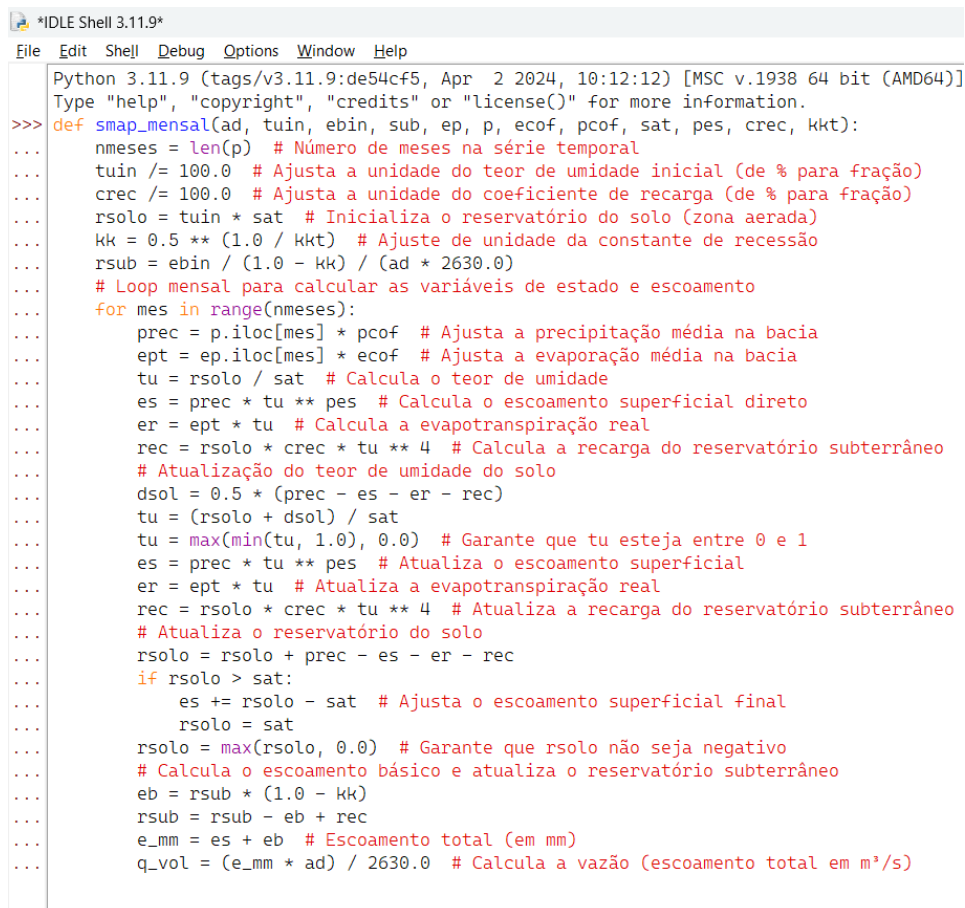
3.4 METODOLOGIAS DE APLICAÇÃO DO MODELO SMAP MENSAL

3.4.1 Implementação e Execução em Python do Modelo Smap Mensal

O processo de execução e análise dos resultados da modelagem hidrológica para as bacias hidrográficas das estações fluviométricas selecionadas foi completamente realizado em linguagem Python, utilizando o ambiente de desenvolvimento integrado Visual Studio Code (VSCode-x64-1.96.4).

As rotinas originais do modelo SMAP em sua versão mensal estão listadas em Lopes (1999) na linguagem de programação Visual Basic (VB.NET). No presente estudo, realizou-se a conversão desse algoritmo para a linguagem de programação Python, como mostra a Figura 18, preservando-se a sequência do processamento das variáveis, parâmetros e equações de transferência determinadas por Lopes (1999).

Figura 18 – Implementação em python do algoritmo do modelo SMAP mensal.



```

Python 3.11.9 (tags/v3.11.9:de54cf5, Apr 2 2024, 10:12:12) [MSC v.1938 64 bit (AMD64)]
Type "help", "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>> def smap_mensal(ad, tuin, ebin, sub, ep, p, ecof, pcof, sat, pes, cres, kkt):
...     nmeses = len(p) # Número de meses na série temporal
...     tuin /= 100.0 # Ajusta a unidade do teor de umidade inicial (de % para fração)
...     cres /= 100.0 # Ajusta a unidade do coeficiente de recarga (de % para fração)
...     rsolo = tuin * sat # Inicializa o reservatório do solo (zona aerada)
...     kk = 0.5 ** (1.0 / kkt) # Ajuste de unidade da constante de recessão
...     rsub = ebin / (1.0 - kk) / (ad * 2630.0)
...     # Loop mensal para calcular as variáveis de estado e escoamento
...     for mes in range(nmeses):
...         prec = p.iloc[mes] * pcof # Ajusta a precipitação média na bacia
...         ept = ep.iloc[mes] * ecof # Ajusta a evaporação média na bacia
...         tu = rsolo / sat # Calcula o teor de umidade
...         es = prec * tu ** pes # Calcula o escoamento superficial direto
...         er = ept * tu # Calcula a evapotranspiração real
...         rec = rsolo * cres * tu ** 4 # Calcula a recarga do reservatório subterrâneo
...         # Atualização do teor de umidade do solo
...         dsol = 0.5 * (prec - es - er - rec)
...         tu = (rsolo + dsol) / sat
...         tu = max(min(tu, 1.0), 0.0) # Garante que tu esteja entre 0 e 1
...         es = prec * tu ** pes # Atualiza o escoamento superficial
...         er = ept * tu # Atualiza a evapotranspiração real
...         rec = rsolo * cres * tu ** 4 # Atualiza a recarga do reservatório subterrâneo
...         # Atualiza o reservatório do solo
...         rsolo = rsolo + prec - es - er - rec
...         if rsolo > sat:
...             es += rsolo - sat # Ajusta o escoamento superficial final
...             rsolo = sat
...         rsolo = max(rsolo, 0.0) # Garante que rsolo não seja negativo
...         # Calcula o escoamento básico e atualiza o reservatório subterrâneo
...         eb = rsub * (1.0 - kk)
...         rsub = rsub - eb + rec
...         e_mm = es + eb # Escoamento total (em mm)
...         q_vol = (e_mm * ad) / 2630.0 # Calcula a vazão (escoamento total em m³/s)

```

Fonte: Elaboração do Autor.

3.4.2 Implementação e Execução em Python do Algoritmo de Otimização PSO

O algoritmo PSO, utilizado no presente estudo, no processo de calibração automática dos parâmetros do modelo SMAP mensal é oriundo de uma biblioteca Python denominada *pyswarm*, na sua versão 0.6, às principais informações sobre este pacote computacional estão descritas em Pyswarm (2025).

As rotinas em Python de aplicação da metodologia de otimização por enxame de partículas do pacote *pyswarm* estão listadas em Tisimst (2025). A Figura 19, mostra a aplicação dessas rotinas por meio do método *pyswarm.pso*, além da configuração dos limites de busca dos parâmetros do modelo SMAP mensal, que se optou por manter os limites definidos por Lopes (1999) que analisou o comportamento do modelo em variadas regiões hidrográficas brasileiras, como apresenta a Tabela 12. Contudo, para definição da evapotranspiração potencial mensal foi adicionado na calibração o parâmetro *Ecof* variando de 0,5 a 1,5, permitindo que a evapotranspiração de referência padronizada seja ajustada para uma evapotranspiração potencial mais precisa.

Tabela 12 – Limites de busca na calibração automáticas dos parâmetros do Modelo SMAP mensal.

Parâmetro	Limite de Busca	Unidade
Str	400 a 5000	(mm)
Pes	1 a 10	(ad.)
Crec	0 a 70	(%)
Kkt	1 a 6	(meses)
Ecof	0,5 a 1,5	(ad.)

Fonte: Elaboração do Autor.

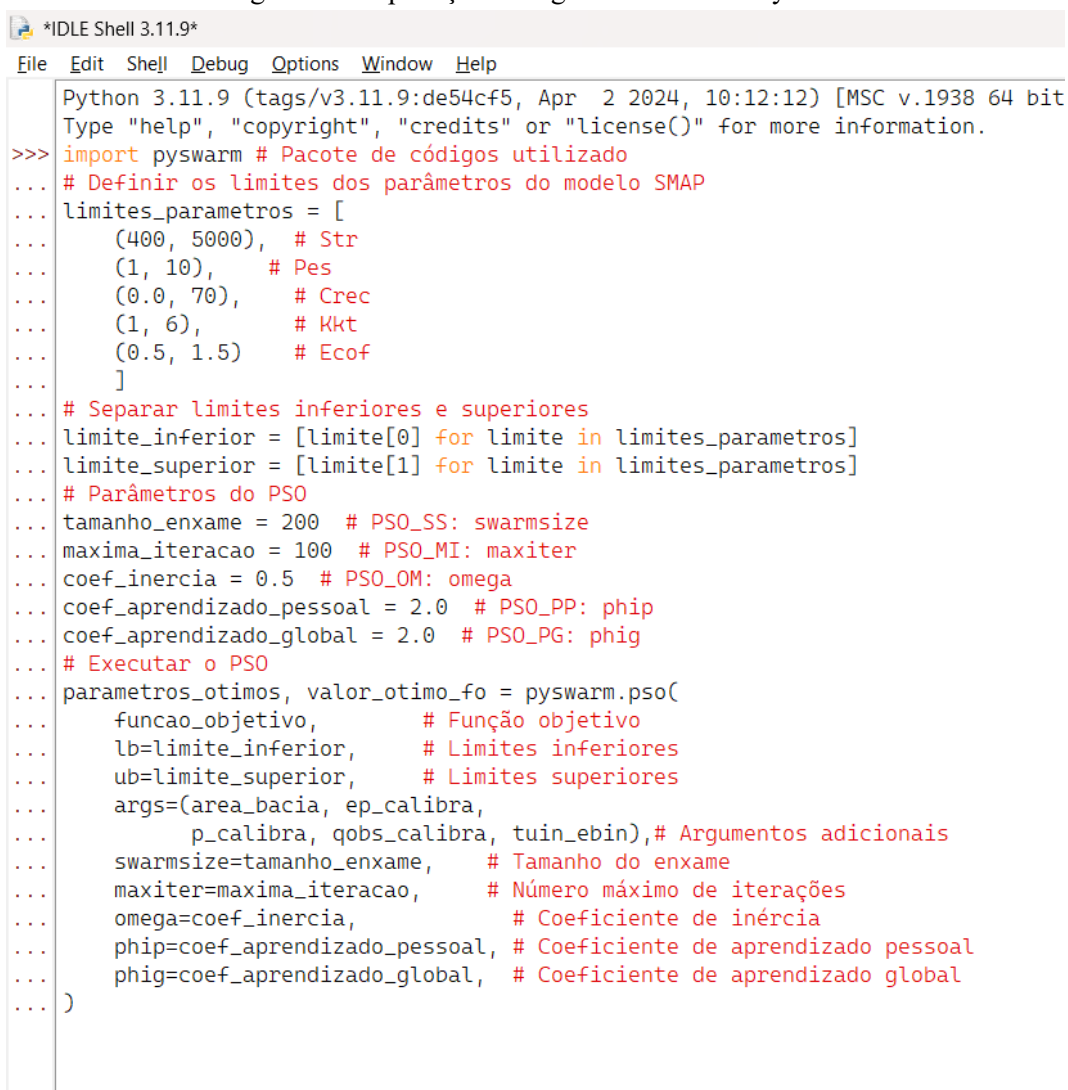
Os principais parâmetros a serem definidos na aplicação do PSO são: o tamanho do enxame de partículas (M); o número máximo de iterações (n); o coeficiente de inércia (w); o coeficiente de aprendizado pessoal da partícula (c_1); o coeficiente de aprendizado global (c_2), os limites de busca das variáveis (*parâmetros do modelo SMAP mensal*) e a função objetivo. Sendo que, o método computacional utilizado no presente estudo aplica a minimização da função objetivo escolhida. A configuração escolhida seguiu aproximadamente a mesma descrita por Pereira (2017). O coeficiente de inércia (w) tem um impacto significativo no desempenho do algoritmo PSO, Schardong et al. (2009) recomendam utilizar valores entre 0,4 e 1,4 para o coeficiente de inércia, no estudo optou-se por aplicar a configuração que está mostrada na Tabela 13.

Tabela 13 – Configuração utilizada no estudo do algoritmo PSO.

Parâmetro	Valor
Número de Variáveis	5 parâmetros do SMAP mensal
Tamanho do Enxame	200 partículas
Número de Iterações	100 iterações
Coef. de inércia (w)	0,5
Coeficiente (c1)	2,0
Coeficiente (c2)	2,0

Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 19 – Aplicação do algoritmo PSO em Python.



```

Python 3.11.9 (tags/v3.11.9:de54cf5, Apr  2 2024, 10:12:12) [MSC v.1938 64 bit
Type "help", "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>> import pyswarm # Pacote de códigos utilizado
... # Definir os limites dos parâmetros do modelo SMAP
... limites_parametros = [
...     (400, 5000), # Str
...     (1, 10), # Pes
...     (0.0, 70), # Crec
...     (1, 6), # Kkt
...     (0.5, 1.5) # Ecof
... ]
... # Separar limites inferiores e superiores
... limite_inferior = [limite[0] for limite in limites_parametros]
... limite_superior = [limite[1] for limite in limites_parametros]
... # Parâmetros do PSO
... tamanho_enxame = 200 # PSO_SS: swarmsize
... maxima_iteracao = 100 # PSO_MI: maxiter
... coef_inercia = 0.5 # PSO_OM: omega
... coef_aprendizado_pessoal = 2.0 # PSO_PP: phip
... coef_aprendizado_global = 2.0 # PSO_PG: phig
... # Executar o PSO
... parametros_otimos, valor_otimo_fo = pyswarm.pso(
...     funcao_objetivo, # Função objetivo
...     lb=limite_inferior, # Limites inferiores
...     ub=limite_superior, # Limites superiores
...     args=(area_bacia, ep_calibra,
...           p_calibra, qobs_calibra, tuin_ebin), # Argumentos adicionais
...     swarmsize=tamanho_enxame, # Tamanho do enxame
...     maxiter=maxima_iteracao, # Número máximo de iterações
...     omega=coef_inercia, # Coeficiente de inércia
...     phip=coef_aprendizado_pessoal, # Coeficiente de aprendizado pessoal
...     phig=coef_aprendizado_global, # Coeficiente de aprendizado global
... )

```

Fonte: Elaboração do Autor.

3.4.3 Calibração e Validação do Modelo Smap Mensal

A calibração automática do modelo SMAP mensal foi realizada individualmente por estação fluviométrica estudada, levando-se em conta uma análise combinada da disponibilidade dos dados fluviométricos e da interferência dos açudes no escoamento, preferindo-se quando

possível, calibrar e validar o modelo em períodos sem a interferência da operação dos açudes e com uma boa quantidade de dados de vazão observada.

Lopes (1999) define que para a calibração da versão mensal do Modelo SMAP são necessários de 2 a 9 anos de dados observados de precipitação, evapotranspiração e vazão média mensal, optou-se para este estudo, selecionar no mínimo 8 anos consecutivos para a calibração e no mínimo 4 anos consecutivos para a validação, podendo conter falhas nas séries de vazões observadas, mas que o número total de meses com dados possua as quantidades de anos mencionadas.

Aplicando o *Split Sample Test* descrito por Klemes (1986), onde o modelo é calibrado com dados de um período e validado com dados de outro, como mostra no exemplo da Tabela 14. Além disso, optou-se por testar e avaliar o desempenho da calibração em uma série completa de no mínimo 16 anos de dados hidrometeorológicos e de vazão média mensal, podendo conter falhas nas séries de vazões observadas, incluindo dados não processados na calibração e validação, com o objetivo de avaliar o desempenho do modelo em uma série mais longa, escolhendo esse valor como sendo o dobro de anos de dados observados empregados na etapa de calibração, essa etapa de avaliação do modelo é chamada neste estudo de análise geral.

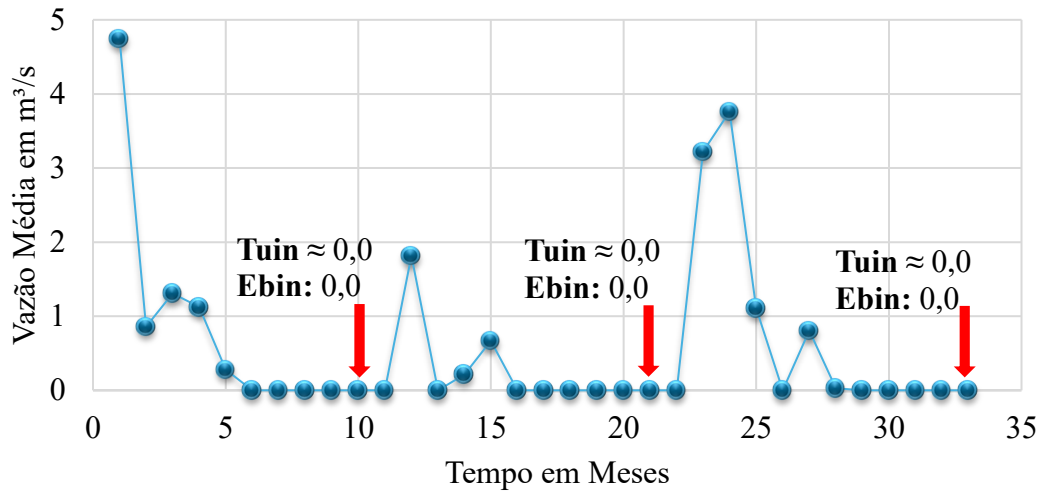
Tabela 14 – Separação das séries de calibração e validação na aplicação do modelo SMAP mensal.

Análise geral da série de vazões médias mensais		
16 anos (192 meses)		
Calibração	Validação	
8 anos	4 anos	

Fonte: Elaboração do Autor.

Não foi utilizado período de aquecimento para calibração do modelo, pois o mês de início dos períodos de calibração e validação foram escolhidos com base na análise visual do hidrograma de vazões médias mensais, como mostrado na Figura 20, identificando os períodos de vazões mínimas registradas nas estações fluviométricos estudadas e escolhendo o mês com o menor valor registrado, frequentemente antes dos picos no hidrograma ou no mês mais seco do ano. Neste período as variáveis de transferência do solo para o subsolo são quase nulas, facilitando a determinação do valor inicial do teor de umidade do solo e do escoamento de base inicial. No presente estudo, a inicialização dos processos na modelagem hidrológica foi realizada com os parâmetros $Tu_{in} = 0$ e $Ebin = 0$, mesma abordagem de inicialização do modelo SMAP executada por Pereira (2017).

Figura 20 – Representação dos meses recomendados para inicialização do modelo SMAP mensal.



Fonte: Elaboração do Autor.

A escolha dos parâmetros ótimos de calibração do modelo SMAP mensal foi realizada utilizando-se como critério maximizar o valor da média aritmética entre os resultados da função objetivo (F_{01}) e função objetivo (F_{02}). Sendo a função F_{01} o Índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), desenvolvido por Nash e Sutcliffe (1970), e a função F_{02} o Índice de Eficiência de Kling-Gupta (KGE), desenvolvido por Gupta et al. (2009). Sendo que, essa escolha foi determinada com base em testes de combinações de diversas métricas, ou o emprego de apenas uma delas na função objetivo, escolhendo a configuração que apresentou os melhores resultados para os testes realizados.

A eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) é amplamente utilizada na calibração e validação de modelos hidrológicos, particularmente em estudos de chuva-vazão, por sua capacidade de avaliar a qualidade do ajuste entre os dados observados e as estimativas do modelo. A principal vantagem do NSE é a simplicidade e a interpretação direta em termos de erro, variabilidade e desempenho do modelo. A fórmula do NSE é dada por:

$$F_{01} = NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{OBS,t} - Q_{SIM,t})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{OBS,t} - \overline{Q_{OBS}})^2}$$

Onde: NSE é o Índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe (*ad.*); $Q_{OBS,t}$ é o valor observado da vazão (m^3/s) no instante de tempo t ; $Q_{SIM,t}$ é o valor simulado (modelado) da vazão (m^3/s) no instante de tempo t ; $\overline{Q_{OBS}}$ é a média aritmética dos valores observados de vazão (m^3/s) e n é o número total de instantes de tempo ou número de dados.

O numerador da equação representa a soma dos quadrados dos erros entre os valores observados e os valores simulados, enquanto o denominador é a soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e a média observada.

A interpretação de desempenho do modelo a partir dos resultados do NSE é:

- NSE = 1: O modelo simula perfeitamente os dados observados; NSE = 0: O modelo tem desempenho equivalente à média dos dados observados; NSE < 0: O modelo tem desempenho pior do que a média dos dados observados, o que indica que ele não está capturando adequadamente as variações das vazões.

Conforme explica Kling et al. (2012), o Índice de Desempenho de Kling-Gupta (KGE) fornece informações valiosas sobre o desempenho do modelo, ao decompor sua avaliação em três componentes: correlação temporal (r), viés (β) e variabilidade (γ). Em termos hidrológicos, o KGE é útil, pois permite avaliar tanto a dinâmica temporal dos fluxos, medida pela correlação r , quanto a preservação da distribuição dos fluxos, refletida nos momentos da série (primeiro e segundo momentos, representados por β e γ). A fórmula simples do KGE facilita sua interpretação, pois o valor do índice representa o pior desempenho entre os três componentes. Por exemplo, um valor de 0,7 indica que todos os componentes têm um desempenho de pelo menos 0,7. Gupta et al. (2009) analisa as vantagens do KGE sobre índices como o NSE ou o erro quadrático médio. A fórmula do KGE é dada por:

$$F_{02} = KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2}$$

Onde: KGE é o Índice de Eficiência de Kling-Gupta (*ad.*); r é a correlação de Pearson (*ad.*) entre os dados modelados e observados, refletindo o grau de associação temporal entre as duas séries; β é o viés (*ad.*), quantifica a diferença relativa entre as médias das séries modelada e observada e o γ é o índice de variabilidade (*ad.*), que compara a dispersão ou desvio padrão das duas séries.

A interpretação de desempenho do modelo a partir dos resultados do KGE é:

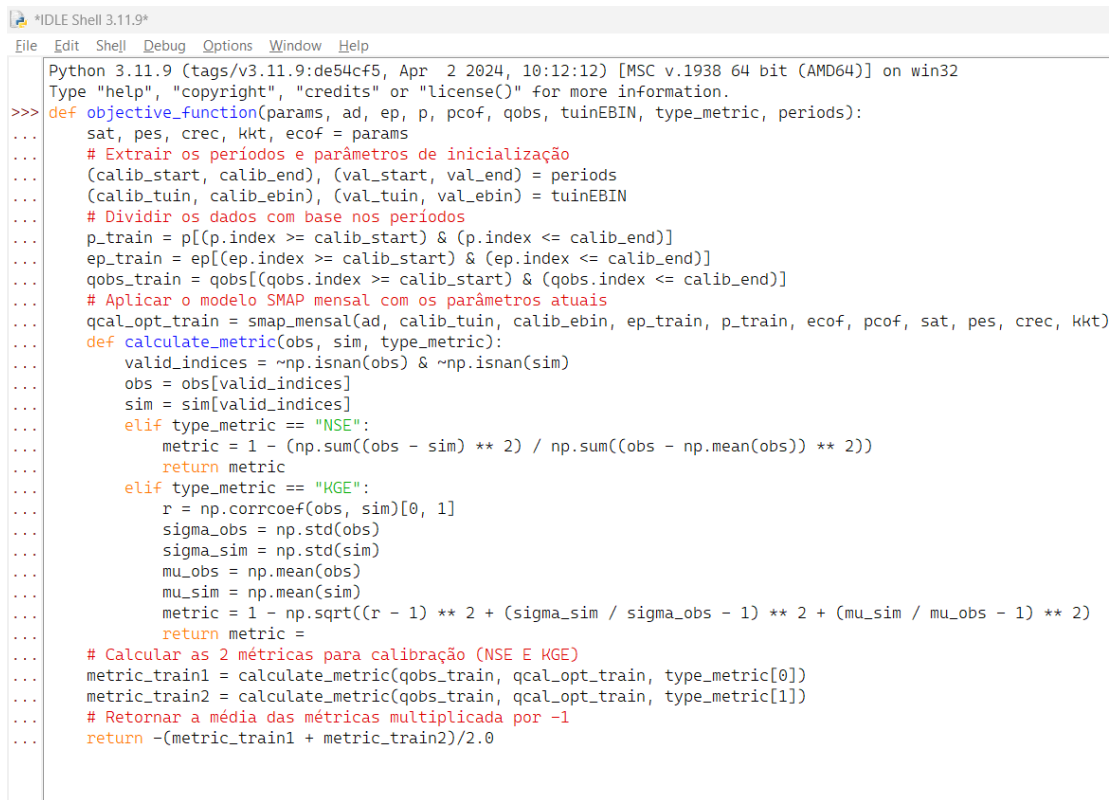
- KGE = 1: O modelo reproduz perfeitamente a correlação temporal, o viés e a variabilidade das vazões observadas; KGE = 0: O modelo apresenta um desempenho limitado, com falhas significativas na correlação, viés ou variabilidade, mas ainda assim captura algumas dinâmicas dos dados observados; KGE < 0: O modelo tem um desempenho insatisfatório, com falhas notáveis em todos os componentes (correlação, viés e variabilidade), indicando que ele não está representando adequadamente os padrões temporais e a distribuição das vazões observadas.

A implementação Python da função objetivo passada no algoritmo PSO está apresentada na Figura 21. Como o algoritmo PSO utilizado no estudo avalia a minimização da função objetivo, foi necessário multiplicar a média aritmética das 2 métricas citadas por -1 para que o processo de minimização seja empregado corretamente. Sendo que, nos cálculos das métricas foi considerado apenas os índices válidos, nos meses que contém vazão observada e simulada, respectivamente. A fórmula da função objetivo empregada no processo na calibração automática com PSO é:

$$F_o = -\frac{(F_{o1} + F_{o2})}{2}$$

Onde: F_o é a função objetivo final (*ad.*); F_{o1} é a função objetivo parcial *NSE* (*ad.*) e F_{o2} é a função objetivo parcial *KGE* (*ad.*).

Figura 21 – Função objetivo empregada na calibração automática.



```

Python 3.11.9 (tags/v3.11.9:de54cf5, Apr 2 2024, 10:12:12) [MSC v.1938 64 bit (AMD64)] on win32
Type "help", "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>> def objective_function(params, ad, ep, p, pcof, qobs, tuinEBIN, type_metric, periods):
...     sat, pes, crec, kkt, ecof = params
...     # Extrair os períodos e parâmetros de inicialização
...     (calib_start, calib_end), (val_start, val_end) = periods
...     (calib_tuin, calib_ebin), (val_tuin, val_ebin) = tuinEBIN
...     # Dividir os dados com base nos períodos
...     p_train = p[(p.index >= calib_start) & (p.index <= calib_end)]
...     ep_train = ep[(ep.index >= calib_start) & (ep.index <= calib_end)]
...     qobs_train = qobs[(qobs.index >= calib_start) & (qobs.index <= calib_end)]
...     # Aplicar o modelo SMAP mensal com os parâmetros atuais
...     qcal_opt_train = smap_mensal(ad, calib_tuin, calib_ebin, ep_train, p_train, ecof, pcof, sat, pes, crec, kkt)
...     def calculate_metric(obs, sim, type_metric):
...         valid_indices = ~np.isnan(obs) & ~np.isnan(sim)
...         obs = obs[valid_indices]
...         sim = sim[valid_indices]
...         elif type_metric == "NSE":
...             metric = 1 - ((np.sum((obs - sim) ** 2) / np.sum((obs - np.mean(obs)) ** 2)))
...             return metric
...         elif type_metric == "KGE":
...             r = np.corrcoef(obs, sim)[0, 1]
...             sigma_obs = np.std(obs)
...             sigma_sim = np.std(sim)
...             mu_obs = np.mean(obs)
...             mu_sim = np.mean(sim)
...             metric = 1 - np.sqrt((r - 1) ** 2 + (sigma_sim / sigma_obs - 1) ** 2 + (mu_sim / mu_obs - 1) ** 2)
...             return metric
...     # Calcular as 2 métricas para calibração (NSE E KGE)
...     metric_train1 = calculate_metric(qobs_train, qcal_opt_train, type_metric[0])
...     metric_train2 = calculate_metric(qobs_train, qcal_opt_train, type_metric[1])
...     # Retornar a média das métricas multiplicada por -1
...     return -(metric_train1 + metric_train2)/2.0

```

Fonte: Elaboração do Autor.

3.4.4 Avaliação de Desempenho do Modelo Smap Mensal

Na etapa de avaliação do desempenho do modelo SMAP mensal nas etapas de calibração, validação e análise geral, além das métricas empregadas na função objetivo descritas anteriormente, sendo elas os índices de eficiência *NSE* e *KGE*, foram calculadas outras que

enriquecem a análise do desempenho do modelo. Sendo essas: Razão do Erro Quadrático Médio (*RSR*) e o Viés Percentual Médio (*PBIAS*).

O RSR (Razão do Erro Quadrático Médio) é uma métrica utilizada para avaliar a performance de modelos preditivos, sendo uma forma de normalizar o RMSE (Erro Quadrático Médio) pela variabilidade dos dados observados. O RSR é uma métrica que, além de calcular o erro do modelo, ajusta esse erro considerando a variabilidade dos dados observados, sendo útil para comparar o desempenho de modelos em diferentes cenários, mesmo que os dados tenham escalas ou distribuições diferentes (Moriasi et al, 2007). A fórmula do RSR é dada por:

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_{OBS,t} - Q_{SIM,t})^2}}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_{OBS,t} - \overline{Q_{OBS}})^2}}$$

Onde: *RSR* é a razão do erro quadrático médio (*ad.*); $Q_{OBS,t}$ é o valor observado da vazão (m^3/s) no instante de tempo t ; $Q_{SIM,t}$ é o valor simulado (modelado) da vazão (m^3/s) no instante de tempo t ; $\overline{Q_{OBS}}$ é a média aritmética dos valores observados de vazão (m^3/s) e n é o número total de instantes de tempo ou número de dados.

A interpretação de desempenho do modelo a partir dos resultados do RSR é:

- RSR próximo de 0: Indica que o modelo tem um bom desempenho, pois o erro é baixo em relação à variabilidade dos dados observados. Em outras palavras, o modelo consegue capturar bem a variabilidade dos dados; RSR próximo de 1: Indica um desempenho pior, pois o modelo tem um erro maior em relação à variabilidade dos dados observados. Ou seja, o modelo não está conseguindo explicar bem os padrões dos dados reais.

O PBIAS (Viés Percentual Médio) é uma métrica que calcula a diferença percentual entre os valores observados e simulados, em relação aos valores observados totais. Em outras palavras, mede o erro absoluto acumulado do modelo, expresso como uma porcentagem dos valores observados totais. O PBIAS fornece uma visão geral do erro direcional do modelo, ou seja, se o modelo tende a superestimar ou subestimar os valores observados. Uma excelente performance do modelo geralmente está associada a um PBIAS próximo de zero, indicando que o erro entre os valores observados e simulados é pequeno em relação à magnitude total dos dados observados (Moriasi et al, 2007). A fórmula do PBIAS é dada por:

$$PBIAS = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{OBS,t} - Q_{SIM,t}) \times 100}{\sum_{t=1}^n Q_{OBS,t}}$$

Onde: $PBIAS$ é o viés percentual médio (%); $Q_{OBS,t}$ é o valor observado da vazão (m^3/s) no instante de tempo t ; $Q_{SIM,t}$ é o valor simulado (modelado) da vazão (m^3/s) no instante de tempo t e n é o número total de instantes de tempo ou número de dados.

A interpretação de desempenho do modelo a partir dos resultados do PBIAS é:

- PBIAS próximo de 0: Indica que o modelo tem um bom desempenho, pois o erro absoluto é pequeno em relação ao total dos dados observados. Em outras palavras, o modelo está bem balanceado e não está superestimando nem subestimando os resultados; PBIAS positivo: Indica que o modelo superestima os valores simulados, ou seja, os valores simulados estão geralmente acima dos valores observados; PBIAS negativo: Indica que o modelo subestima os valores simulados, ou seja, os valores simulados estão geralmente abaixo dos valores observados.

Moriasi et al. (2007) desenvolveu uma classificação qualitativa para o desempenho de modelos hidrológicos, a partir dos resultados de métricas avaliativas, apresentadas na Tabela 15. Sendo que, o presente estudo avalia as 3 métricas abordadas por ele: NSE, RSR e PBIAS (%); em todas as etapas de avaliação do desempenho do modelo SMAP mensal: calibração, validação e análise geral.

Tabela 15 – Classificação qualitativa do desempenho de modelos hidrológicos.

Classificação	RSR	NSE	PBIAS(%)
Muito Bom	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$	$0,75 < NSE \leq 1,00$	$PBIAS < \pm 10$
Bom	$0,50 < RSR \leq 0,60$	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfatório	$0,50 < RSR \leq 0,70$	$0,50 < NSE \leq 0,65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Insatisfatório	$RSR > 0,70$	$NSE \leq 0,50$	$PBIAS \geq \pm 25$

Fonte: Moriasi et al. (2007).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DO DESEMPENHO DO MODELO SMAP MENSAL NA CALIBRAÇÃO

A aplicação do modelo SMAP mensal no processo de calibração foi realizada conforme discutido na metodologia de aplicação do modelo estudado, considerando-se no mínimo 8 anos de dados observados de vazão média mensal, além das séries contínuas de precipitação e evapotranspiração de referência média mensal, oriundas do aplicativo HecIMS. A calibração do modelo foi testada em vários intervalos temporais das séries de vazão média mensal, preferindo os períodos com mais dados fluviométricos e menor interferência dos barramentos.

A etapa de calibração é fundamental pois define os parâmetros do modelo considerados ótimos para as bacias hidrográficas estudadas, sendo esse mesmo conjunto de parâmetros empregado na fase de validação e na análise do modelo numa série de dados mais longa.

Os resultados da etapa de calibração, para as estações fluviométricas dos 3 rios (Capibaribe, Goitá, Tapacurá) da bacia hidrográfica do rio Capibaribe estão organizados na Tabela 16. Nesta tabela, estão descritas as datas dos períodos de calibração, a quantidade de dados fluviométricos empregados, podemos observar também os 5 parâmetros do modelo SMAP mensal (Str, Pes, Crec, Kkt, Ecof), calibrados automaticamente para as estações fluviométricas estudadas, utilizando o algoritmo de otimização por enxame de partículas (PSO). Além disso, os resultados das métricas avaliativas de desempenho do modelo estão mostradas com a classificação qualitativa dessas, conforme Moriasi et al. (2007).

De maneira geral, a fase de calibração apresentou bons resultados, como mais esperado, pois nesta fase os parâmetros do modelo são ajustados iterativamente para minimizar a diferença entre as vazões calculadas pelo modelo e as vazões observadas. Porém na validação o modelo calibrado é testado em um conjunto de dados independente sem ajuste de parâmetros, com objetivo de verificar se o modelo generaliza bem as condições não usadas na calibração, o que pode levar a resultados não positivos ou ruins. As estações fluviométricas São Lourenço da Mata II (rio Capibaribe), Engenho Sítio (rio Goitá) e Vitória de Santo Antão (rio Tapacurá) apresentaram excelentes resultados na calibração, com as 3 métricas avaliativas de desempenho classificadas como “Muito Bom”. Contudo, a estação fluviométrica Santa Cruz do Capibaribe apresentou calibração “Insatisfatória” com NSE= 0,10; RSR= 0,95 e PBIAS= 9,04 %. Esses resultados da etapa de calibração serão discutidos de forma individualizada a seguir, analisando-se 2 estações fluviométricas com resultados muito bons (39187800, 39170000) e uma 1 estação fluviométrica com resultado insatisfatório (39100000).

Tabela 16 – Resultados da etapa de calibração do modelo SMAP mensal.

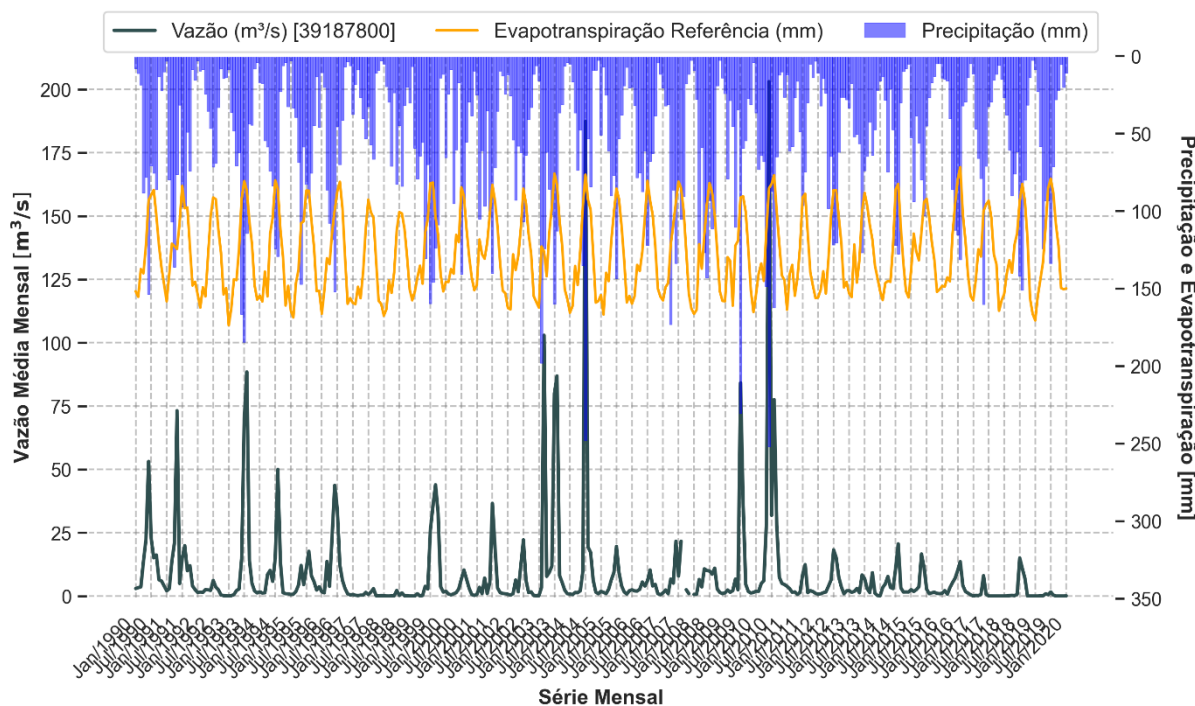
Avaliação do Modelo SMAP Mensal	Estações Fluviométricas Analisadas na Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe									
Nome do Rio	CAPIBARIBE						GOITÁ		TAPACURÁ	
Código da Estação	39100000	39130000	39140000	39145000	39150000	39187800	39154000	39155000	39170000	39180000
Nome da Estação	SANTA CRUZ DO CAPIBARIBE	TORITAMA	SALGADINHO	LIMOEIRO	PAUDALHO	SÃO LOURENÇO DA MATA II	ENGENHO CANAVIEIRA	ENGENHO SÍTIO	VITÓRIA DE SANTO ANTÃO	ENGENHO BELA ROSA I
Início da Calibração	12/1987	12/1974	12/1984	12/1974	12/1967	12/1993	12/2002	12/1967	12/1985	12/1967
Fim da Calibração	12/1997	12/1987	12/1996	12/1987	12/1977	12/2001	12/2011	12/1977	12/1995	12/1975
Dados (anos)	10	12	12	12	9	8	8	10	8	8
SMAP Str (mm)	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	468,42	1364,77	400,00	400,00	400,00
SMAP Pes (ad.)	2,62	2,08	2,78	2,21	2,49	2,91	1,97	2,21	5,58	3,20
SMAP Crec (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,94	0,00	49,00	6,44	0,00
SMAP Kkt (meses)	5,19	3,54	1,55	3,70	5,48	6,00	2,75	6,00	6,00	1,00
SMAP Ecof (ad.)	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,47	0,77	0,83
Métrica NSE (ad.)	0,10	0,72	0,78	0,66	0,72	0,82	0,71	0,91	0,90	0,74
Métrica RSR (ad.)	0,95	0,53	0,47	0,58	0,53	0,43	0,54	0,31	0,31	0,51
Métrica PBIAS (%)	9,04	13,51	0,55	12,15	1,19	-0,25	2,62	0,09	-0,07	-0,49
Classificação NSE	Insatisfatório	Bom	Muito Bom	Bom	Bom	Muito Bom	Bom	Muito Bom	Muito Bom	Bom
Classificação RSR	Insatisfatório	Bom	Muito Bom	Bom	Bom	Muito Bom	Bom	Muito Bom	Muito Bom	Bom
Classificação PBIAS	Muito Bom	Bom	Muito Bom	Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom

Fonte: Elaboração do Autor.

4.1.1 Análise da Calibração: Estação Fluviométrica São Lourenço da Mata II (39187800)

A estação fluviométrica denominada São Lourenço da Mata II, com código identificador 39187800, apresentou os melhores resultados na fase de calibração, das estações localizadas no rio principal da bacia, sendo a mais próxima do exutório da bacia hidrográfica, sendo a última no rio Capibaribe de montante para jusante, possuindo assim, a maior área de drenagem do conjunto, com cerca de 7303,08 km², enquanto a bacia hidrográfica do rio Capibaribe possui 7.454,88 km². As séries hidrológicas de entrada para a realização da modelagem hidrológica, na etapa de calibração e validação da estação 39187800, estão apresentadas no hidrograma Figura 22.

Figura 22 – Hidrograma das séries hidrológicas utilizadas no modelo SMAP mensal: Estação São Lourenço da Mata II.

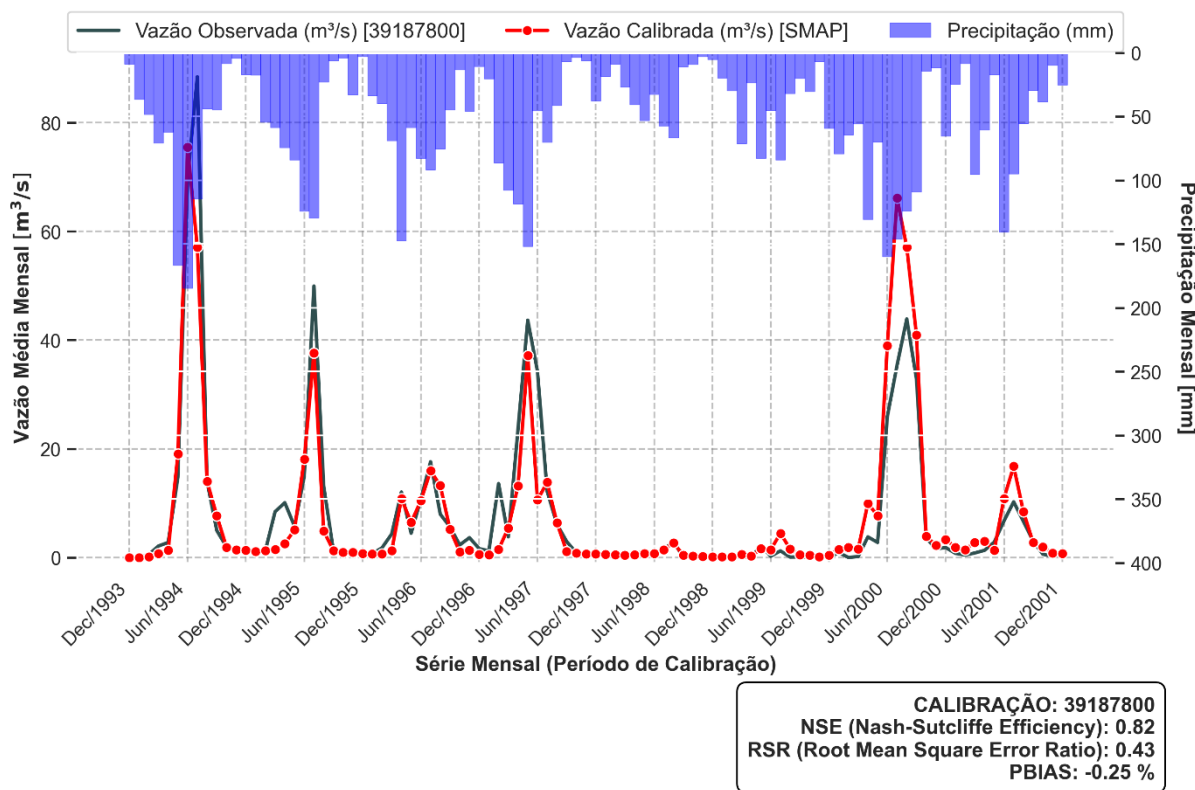


Fonte: Elaboração do Autor.

O período de calibração teve um total de 8 anos de 12/1993 a 12/2001, sendo escolhido a partir da disponibilidade de dados desta estação, que começa a registrar vazões a partir do mês 01/1990. Os resultados da parametrização automatizada do modelo SMAP mensal na calibração são: Str= 468,42 mm; Pes= 2,91; Crec= 11,94%; Kkt= 6,00 meses e Ecof= 1,50. As métricas avaliativas apresentaram os seguintes valores: NSE= 0,82; RSR= 0,43 e PBIAS= -0,25 %. Os resultados das métricas indicam um excelente desempenho do modelo na calibração: o NSE e RSR refletem a precisão na reprodução da variabilidade temporal das vazões, enquanto o PBIAS= -0,25 % mostra ausência de viés sistemático, confirmando a robustez da

parametrização para o período analisado. A Figura 23, mostra o hidrograma de calibração para a estação 39187800, onde podemos observar uma relativa aderência das vazões modelas nas vazões observadas.

Figura 23 – Hidrograma da calibração do Modelo SMAP mensal: Estação São Lourenço da Mata II

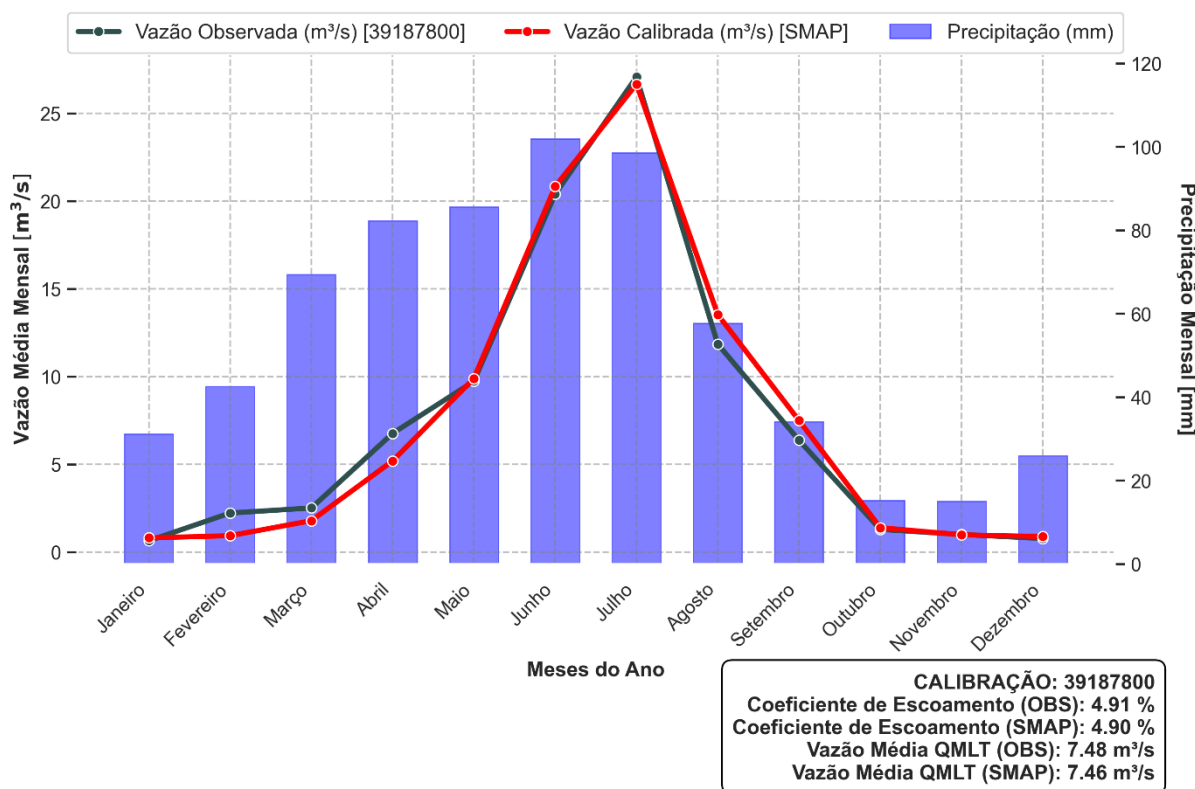


Como mostra a Figura 23, o modelo em alguns momentos superestima ou subestima as vazões médias mensais, o que fica evidente nos picos de vazões durante os meses mais chuvosos, como nos eventos ocorridos de 06/2000 a 12/2000. Essa característica revela as dificuldades do modelo em representar os eventos extremos.

Como apresentado na Tabela 9, utilizada para analisar a interferência dos açudes no escoamento das estações fluviométricas, a montante da estação São Lourenço da Mata II estão localizados todos os grandes açudes da bacia do rio Capibaribe. No período de calibração, todos os açudes já estavam em operação, com os maiores em capacidade de armazenamento sendo Carpina (270 hm³) e Jucazinho (327 hm³), construídos em 1992 e 1998, respectivamente. Este fato indica que a vazão observada está sobre efeito dos reservatórios, por conta disso, as vazões utilizadas para a determinação da vazão modelada são originadas da combinação dos escoamentos naturais na bacia hidrográfica e dos escoamentos controlados e regularizados pelas operações dos reservatórios.

Na Figura 24, observamos a comparação das médias mensais fluviométricas das vazões modeladas e observadas para a estação 39187800, a vazão média de longo termo (QMLT) e o coeficiente de escoamento, este sendo a razão entre o escoamento médio anual em milímetros e a precipitação média anual da bacia hidrográfica, que nesse caso são aproximadamente os mesmos, a comparação gráfica indica que o modelo conseguiu reproduzir adequadamente a distribuição sazonal das vazões.

Figura 24 – Comparação das vazões médias mensais na calibração do Modelo SMAP mensal: Estação São Lourenço da Mata II.



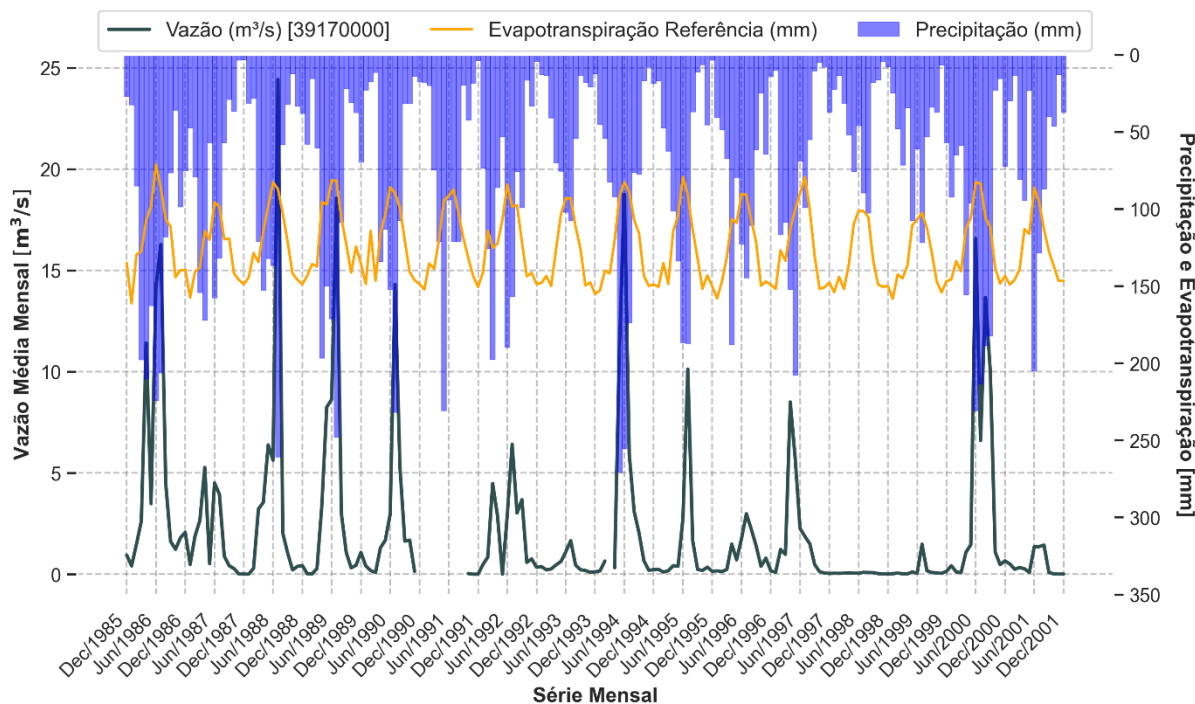
Fonte: Elaboração do Autor.

4.1.2 Análise da Calibração: Estação Fluviométrica Vitória de Santo Antão (39170000)

A estação fluviométrica denominada Vitória de Santo Antão, com código identificador 39170000, apresentou um excelente resultado na fase de calibração, das 2 estações localizadas no rio Tapacurá, afluente do rio Capibaribe, com localização em seção fluvial a montante do açude Tapacurá, sendo uma estação fluviométrica que registra vazões sem a interferência de reservatórios a montante, possui uma área de drenagem de 263,44 km², a menor do conjunto de estações fluviométricas estudadas. As séries hidrológicas de entrada para a realização da modelagem hidrológica, na etapa de calibração e validação da 39170000, estão apresentadas no hidrograma da Figura 25. A vazão observada, utilizada para a determinação da vazão modelada,

é provavelmente efeito dos escoamentos naturais na bacia, por conta da ausência de operações de reservatórios a montante.

Figura 25 – Hidrograma das séries hidrológicas utilizadas no modelo SMAP mensal: Estação Vitória de Santo Antão.

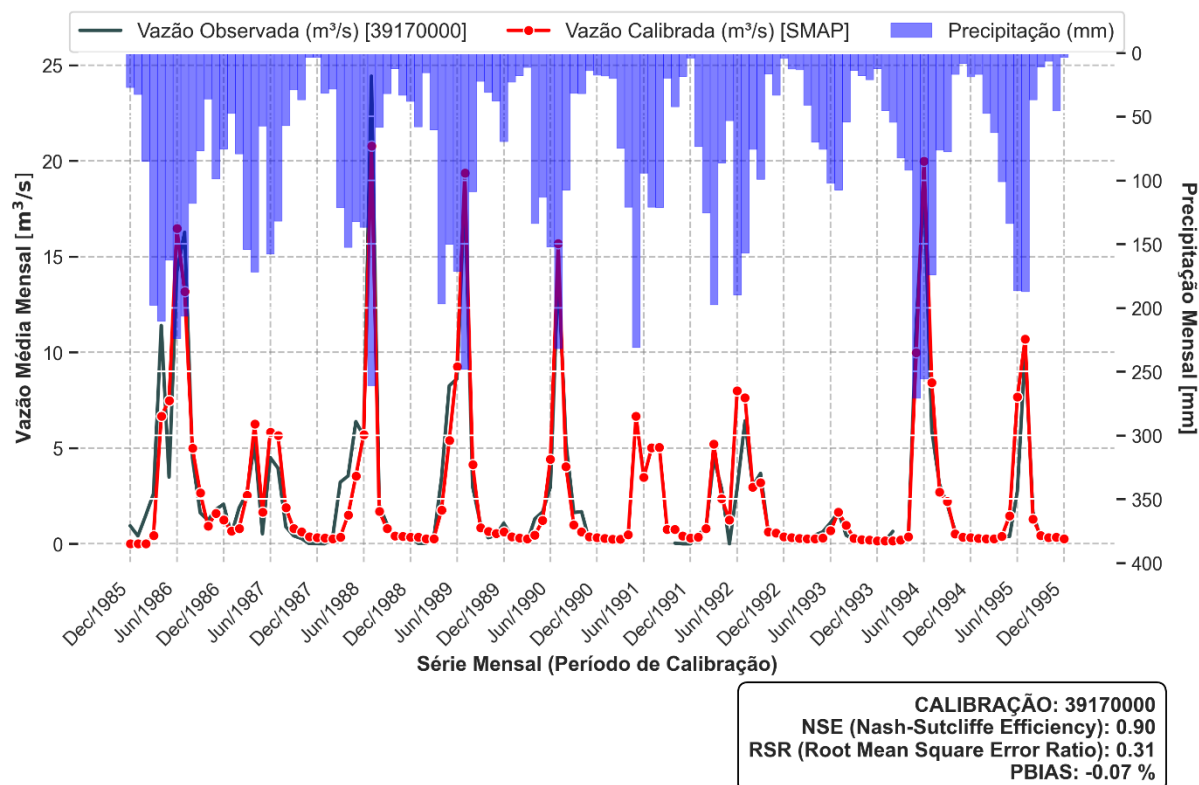


Fonte: Elaboração do Autor.

O período de calibração teve um total de 8 anos de 12/1987 a 12/1995, sendo escolhido a partir da disponibilidade de dados desta estação, que começa a registrar vazões a partir do mês 04/1967. Os resultados da parametrização automatizada do modelo SMAP mensal na calibração são: $Str = 400,00$ mm; $Pes = 5,58$; $Crec = 6,44\%$; $Kkt = 6,00$ meses e $Ecof = 0,77$. As métricas avaliativas apresentaram os seguintes valores: $NSE = 0,90$; $RSR = 0,31$ e $PBIAS = -0,07\%$. Os resultados das métricas indicam um excelente desempenho do modelo na calibração: o NSE e RSR refletem a precisão na reprodução da variabilidade temporal das vazões, enquanto o $PBIAS = -0,07\%$ mostra ausência de viés sistemático, confirmando a robustez da parametrização para o período analisado.

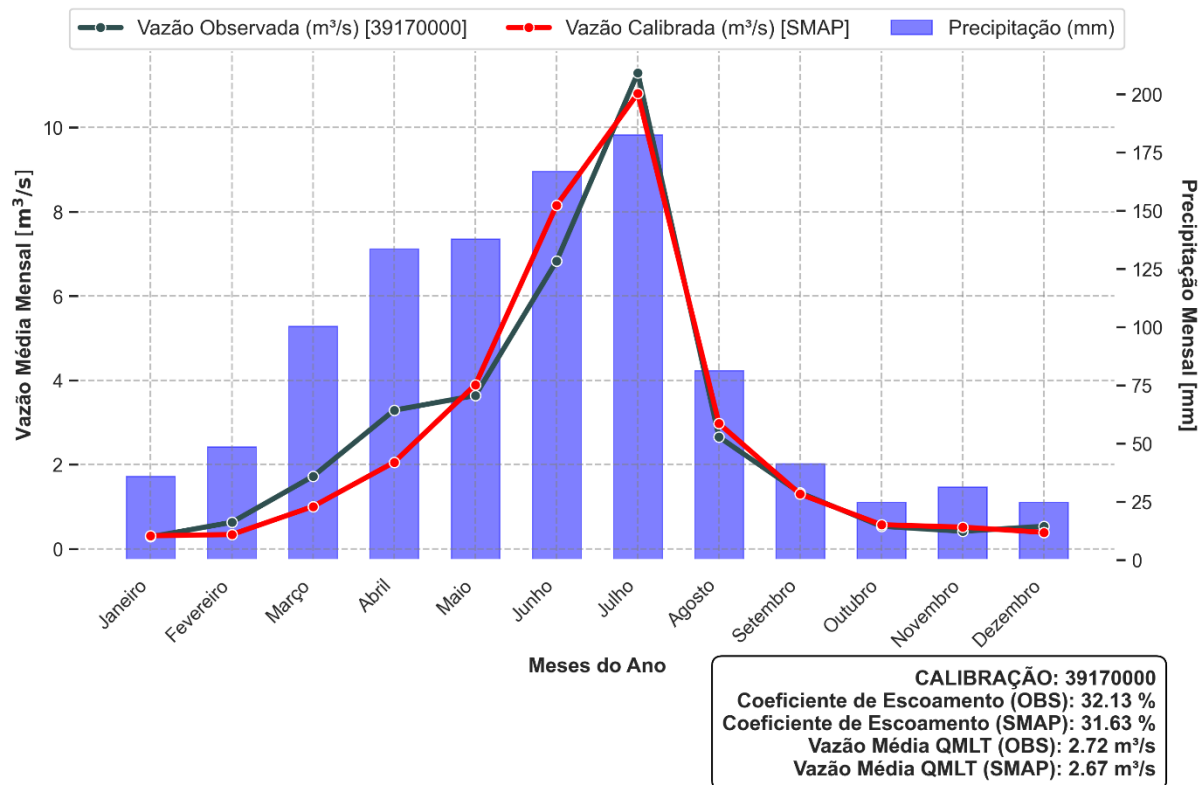
A Figura 26, mostra o hidrograma de calibração da estação 39170000, onde podemos observar uma relativa aderência das vazões modelas nas vazões observadas. Na Figura 27, observamos a comparação das médias mensais fluviométricas das vazões modeladas e observadas para a estação 39170000, a vazão média de longo termo (QMLT) e o coeficiente de escoamento, são aproximadamente os mesmos, a comparação gráfica e das métricas indica que o modelo conseguiu reproduzir adequadamente a distribuição sazonal das vazões.

Figura 26 – Hidrograma da calibração do Modelo SMAP mensal: Estação Vitória de Santo Antônio.



Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 27 – Comparação das vazões médias mensais na calibração do Modelo SMAP mensal: Estação Vitória de Santo Antônio.

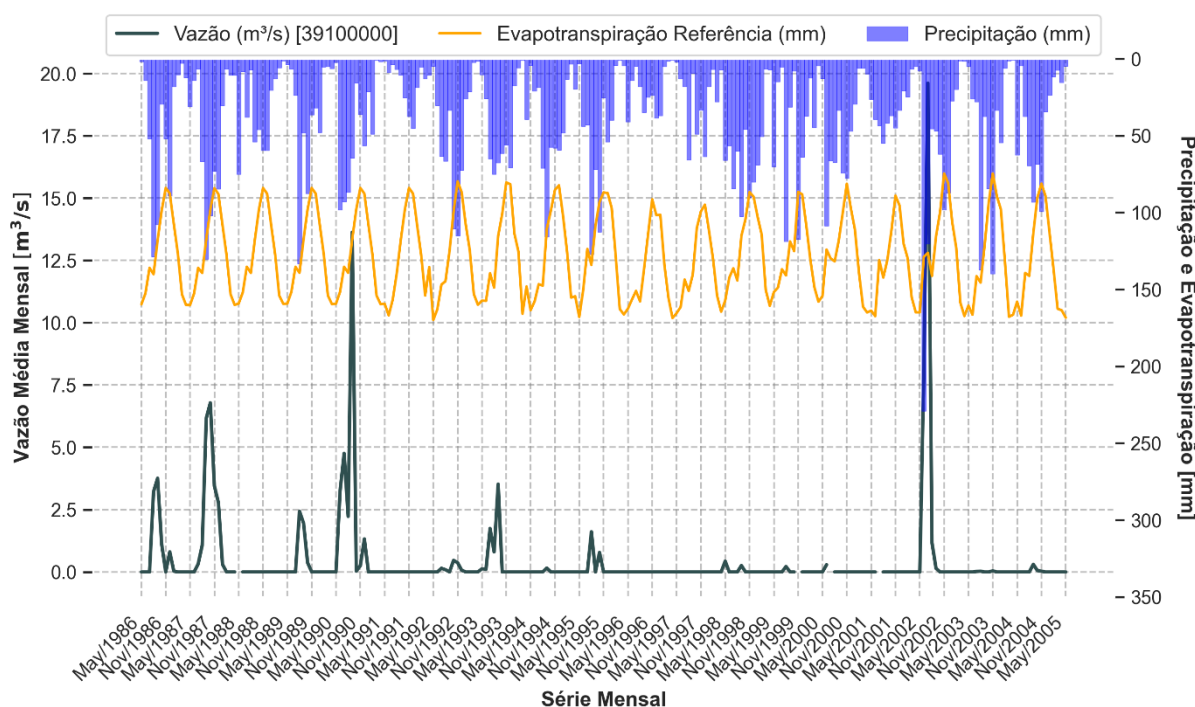


Fonte: Elaboração do Autor.

4.1.3 Análise da Calibração: Estação Fluviométrica Santa Cruz do Capibaribe (39100000)

A estação fluviométrica denominada Santa Cruz do Capibaribe, com código identificador 39100000, apresentou os piores resultados da fase de calibração, sendo a primeira estação fluviométrica do rio Capibaribe, a mais próxima da cabeceira do rio, com localização em seção fluvial a jusante do açude Poço Fundo, sendo uma estação fluviométrica que registra vazões com a interferência deste reservatório desde o início dos seus registros históricos em 05/1986, possui uma área de drenagem de 1565,93 km². As séries hidrológicas de entrada para a realização da modelagem hidrológica, na etapa de calibração e validação da 39100000, estão apresentadas no hidrograma da Figura 28. A vazão observada, utilizada para a determinação da vazão modelada, é provavelmente efeito da combinação dos escoamentos naturais na bacia e dos escoamentos controlados e regularizados pela operação do reservatório Poço Fundo.

Figura 28 – Hidrograma das séries hidrológicas utilizadas no modelo SMAP mensal: Estação Santa Cruz do Capibaribe.



Fonte: Elaboração do Autor.

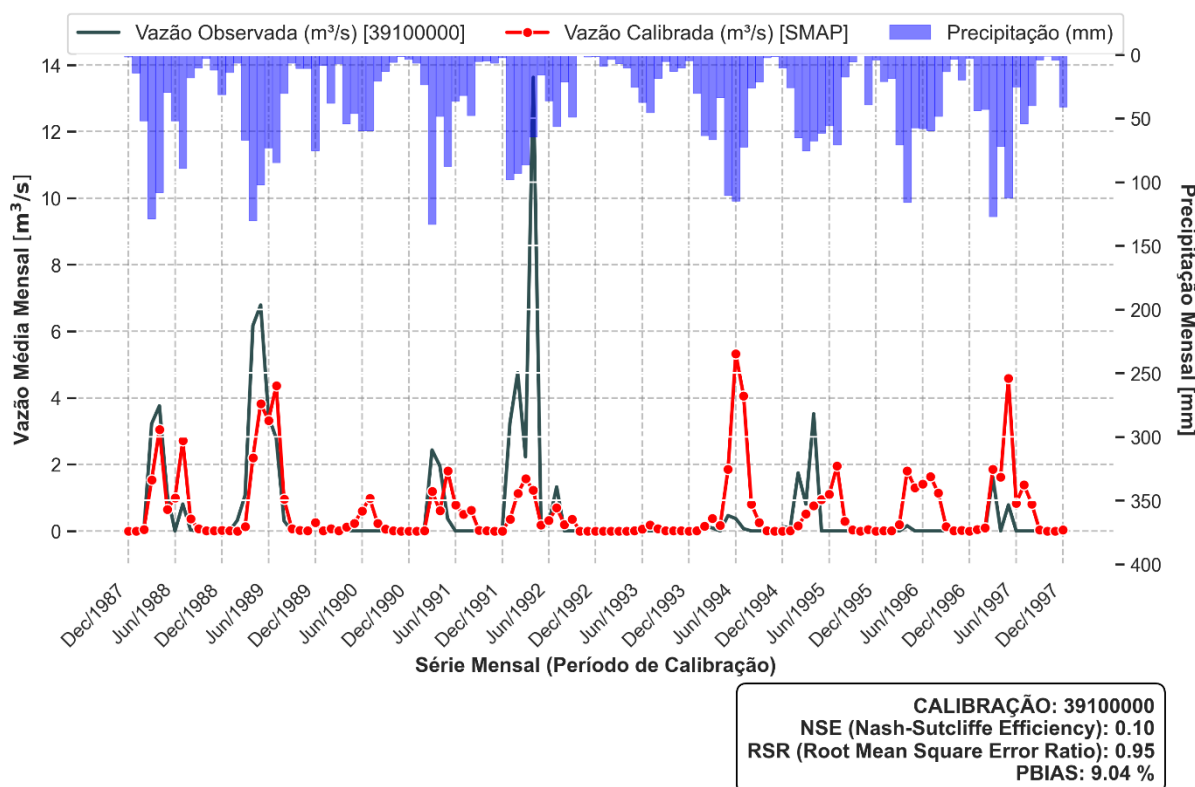
O período de calibração teve um total de 10 anos de 12/1987 a 12/1997, sendo escolhido a partir da disponibilidade de dados desta estação, que começa a registrar vazões a partir do mês 05/1986. Os resultados da parametrização automatizada do modelo SMAP mensal na calibração são: Str= 400,00 mm; Pes= 2,62; Crec= 0,00%; Kkt= 4,98 meses e Ecof= 1,50. As métricas avaliativas apresentaram os seguintes valores: NSE= 0,10; RSR= 0,95 e PBIAS= -9,04 %. Os resultados das métricas indicam um desempenho insatisfatório do modelo na calibração. A combinação de uma PBIAS classificado como bom, mas com o NSE e RSR

insatisfatórios sugere que o modelo consegue reproduzir a média das vazões, mas falha em capturar a variabilidade temporal.

A Figura 29, mostra o hidrograma de calibração da estação 39100000, onde podemos observar a falta de aderência das vazões modelas nas vazões observadas, verifica-se uma baixa relação entre chuva e vazão observada, em alguns períodos verificamos a ocorrência de uma vazão média mensal alta, mas não visualizamos os acumulados mensais de precipitação que causaram isso, como de 12/1991 a 06/1992. Sendo que, em outros momentos do período de calibração percebemos o contrário, como de 12/1993 a 12/1994, onde observamos uma sequência considerável de acumulados mensais de precipitação, mas não verificamos a vazão observada média mensal correspondente a esses acumulados.

Sobre o PBIAS de 9,04 %, classificado como bom, podemos afirmar que o modelo está errando para mais em alguns períodos e para menos em outros, cancelando o viés global, como observado. O PBIAS reflete o viés sistemático médio, a tendência central, e não a magnitude dos erros individuais. Assim, mesmo com erros altos em momentos específicos, se os desvios positivos e negativos se equilibrarem, o PBIAS será baixo ou próximo de zero.

Figura 29 – Hidrograma da calibração do Modelo SMAP mensal: Estação Santa Cruz do Capibaribe.



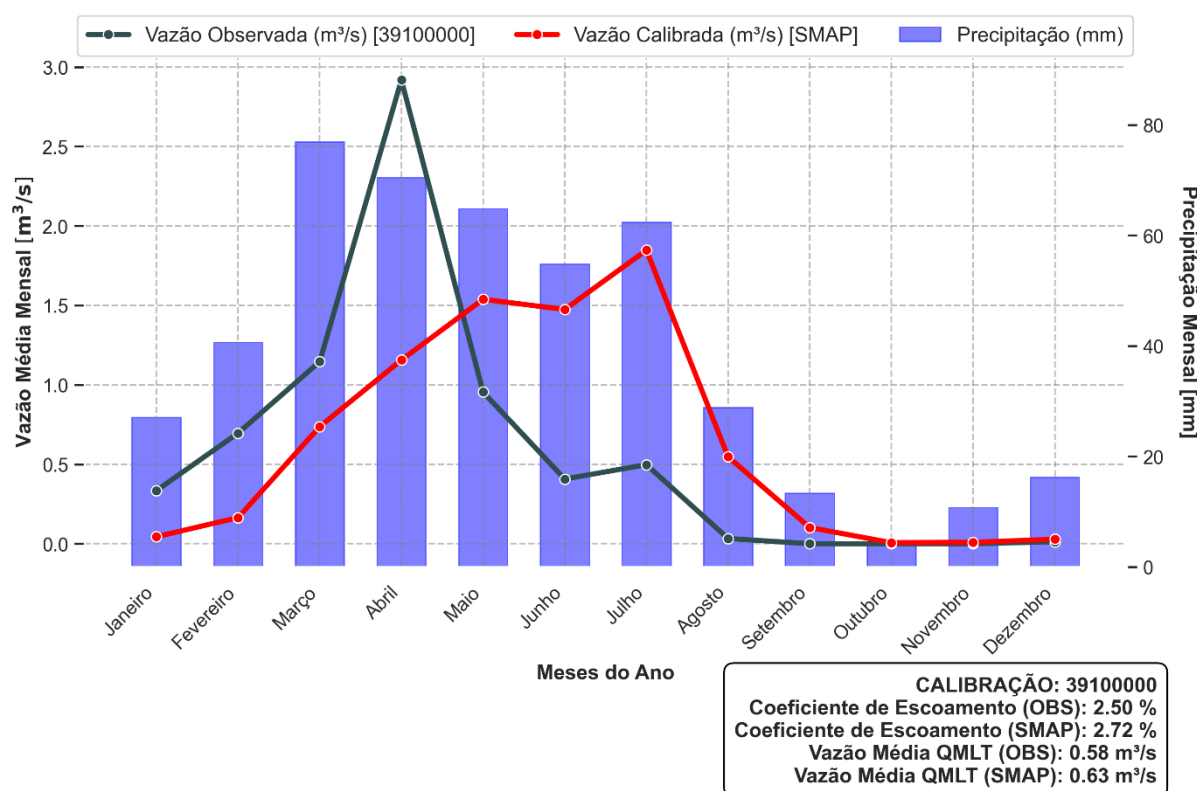
Fonte: Elaboração do Autor.

Na Figura 30, observamos a comparação das médias mensais fluviométricas das vazões modeladas e observadas para a estação 39100000, a vazão média de longo termo (QMLT) e o

coeficiente de escoamento. Apesar da baixa diferença entre os valores médios dos dados modelados e observados, a variabilidade temporal está demasiadamente distinta, indicando que o modelo não conseguiu reproduzir adequadamente a distribuição sazonal das vazões.

As possíveis causas para o desempenho insatisfatório de um modelo hidrológico são diversas, desde a própria limitação do modelo matemático, em representar a complexidade dos fenômenos reais que ocorrem na bacia hidrográfica até a ausência de precisão ou veracidade dos dados empregados na modelagem como precipitação, evapotranspiração e vazões observadas, que podem ser registrados ou processados de forma incorreta ou inapropriada, a presença de açudes interferindo no escoamento, entre outros. O presente estudo não aborda análises por menores da qualidade dos dados utilizados na modelagem hidrológica, o que pode ser um dos fatores para o desempenho ruim do modelo SMAP mensal em alguns testes, seja de calibração ou validação.

Figura 30 – Comparação das vazões médias mensais na calibração do Modelo SMAP mensal: Estação Santa Cruz do Capibaribe.



Fonte: Elaboração do Autor

4.2 ANÁLISE DO DESEMPENHO DO MODELO SMAP MENSAL NA VALIDAÇÃO

A aplicação do modelo SMAP mensal no processo de validação foi realizada conforme discutido na metodologia de aplicação do modelo estudado, considerando-se no mínimo 4 anos de dados observados de vazão média mensal, além das séries contínuas de precipitação e

evapotranspiração de referência média mensal, oriundas do aplicativo HecIMS. A validação do modelo foi testada em intervalos temporais não utilizadas no processo de calibração das séries de vazão média mensal. Em geral, os períodos de validação foram intervalos temporais posteriores aos intervalos utilizados na calibração, como explicado na seção metodológica através da Tabela 14.

A etapa de validação é fundamental pois permite verificar a eficácia do modelo em dados que não foram empregados durante o processo de calibração, avaliando a sua capacidade de generalização, ajudando identificar possíveis falhas ou limitações do modelo, que podem não ser evidentes durante a calibração.

Os resultados da etapa de validação, para as estações fluviométricas dos 3 rios (Capibaribe, Goitá, Tapacurá) da bacia hidrográfica do rio Capibaribe estão organizados na Tabela 17. Nesta tabela, estão descritas as datas dos períodos de validação, a quantidade de dados fluviométricos empregados, os parâmetros calibrados do modelo SMAP mensal (Str, Pes, Crec, Kkt, Ecof). Além disso, os resultados das métricas avaliativas de desempenho do modelo estão mostradas com a classificação qualitativa dessas, conforme Moriasi et al. (2007).

De maneira geral, a fase de validação do modelo apresentou resultados piores que a de calibração. As estações fluviométricas São Lourenço da Mata II (rio Capibaribe), Engenho Sítio (rio Goitá) e Vitória de Santo Antão (rio Tapacurá) mostraram os melhores resultados, sendo que essas obtiveram classificação de desempenho “Boa” ou “Muito Boa” em pelo menos 2 das 3 métricas avaliadas. Contudo, 4 estações fluviométricas do rio Capibaribe apresentaram resultados insatisfatórios nas 3 métricas avaliadas, sendo elas: Santa Cruz do Capibaribe, Toritama, Salgadinho e Limoeiro. Além disso, a estação Engenho Belo Rosa I (rio Tapacurá) também apresentou resultados insatisfatórios nas 3 métricas avaliadas.

A degradação do desempenho na fase de validação pode estar associada a fatores como sobreajuste do modelo durante a calibração, que limita sua capacidade de generalização, à variabilidade hidrológica não capturada adequadamente no período de calibração (como eventos extremos ou mudanças sazonais), e a intervenções antrópicas na bacia hidrográfica (alterações no uso do solo, captações irregulares ou operação de estruturas hídricas) não que foram incorporadas às simulações. A avaliação e interpretação dos resultados da etapa de validação serão discutidos de forma individualizada a seguir, analisando-se 2 estações fluviométricas com bons resultados (39155000, 39170000) e 1 estação fluviométrica com resultados insatisfatórios (39130000).

Tabela 17 – Resultados da etapa de validação do modelo SMAP mensal.

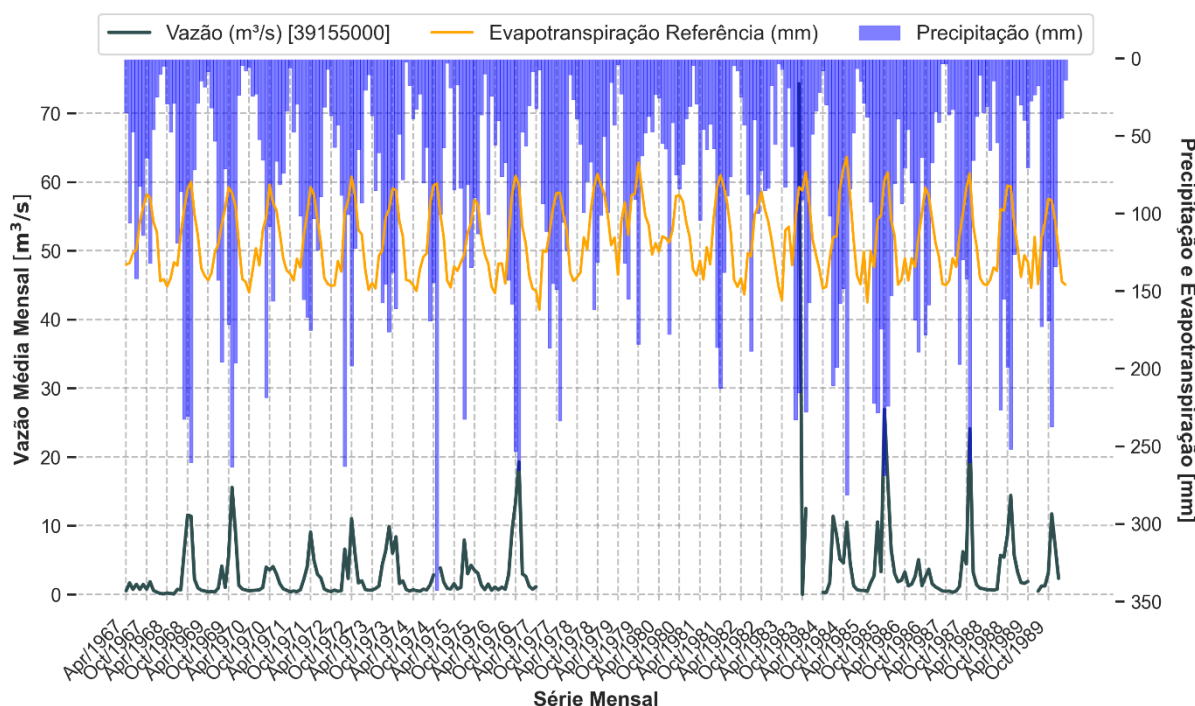
Avaliação do Modelo SMAP Mensal	Estações Fluviométricas Analisadas na Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe									
Nome do Rio	CAPIBARIBE						GOITÁ		TAPACURÁ	
Código da Estação	39100000	39130000	39140000	39145000	39150000	39187800	39154000	39155000	39170000	39180000
Nome da Estação	SANTA CRUZ DO CAPIBARIBE	TORITAMA	SALGADINHO	LIMOEIRO	PAUDALHO	SÃO LOURENÇO DA MATA II	ENGENHO CANAVIEIRA	ENGENHO SÍTIO	VITÓRIA DE SANTO ANTÃO	ENGENHO BELA ROSA I
Início da Validação	12/1999	12/1992	12/1999	12/1993	12/1987	12/2010	12/2012	12/1984	12/1996	12/1984
Fim da Validação	12/2004	12/1997	12/2004	12/1998	12/1992	12/2015	12/2016	12/1988	12/2001	12/1989
Dados (anos)	5	5	5	5	5	5	4	4	5	5
SMAP Str (mm)	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	468,42	1364,77	400,00	400,00	400,00
SMAP Pes (ad.)	2,62	2,08	2,78	2,21	2,49	2,91	1,97	2,21	5,58	3,20
SMAP Crec (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,94	0,00	49,00	6,44	0,00
SMAP Kkt (meses)	5,19	3,54	1,55	3,70	5,48	6,00	2,75	6,00	6,00	1,00
SMAP Ecof (ad.)	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,47	0,77	0,83
Métrica NSE (ad.)	0,41	-5,69	0,21	-0,97	0,58	0,82	0,62	0,73	0,74	-1,99
Métrica RSR (ad.)	0,77	2,59	0,89	1,40	0,64	0,42	0,62	0,52	0,51	1,73
Métrica PBIAS (%)	74,41	317,43	111,68	191,31	-24,60	-16,67	2,21	3,23	11,66	162,50
Classificação NSE	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório	Satisfatório	Muito Bom	Satisfatório	Bom	Bom	Insatisfatório
Classificação RSR	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório	Satisfatório	Muito Bom	Satisfatório	Bom	Bom	Insatisfatório
Classificação PBIAS	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório	Satisfatório	Satisfatório	Muito Bom	Muito Bom	Bom	Insatisfatório

Fonte: Elaboração do Autor.

4.2.1 Análise da Validação: Estação Fluviométrica Engenho Sítio (39155000)

A estação fluviométrica denominada Engenho Sítio, com código identificador 39155000, apresentou os melhores resultados na fase de validação, das 2 estações localizadas no rio Goitá, afluente do rio Capibaribe, possui localização em seção fluvial a montante do açude Goitá, sendo uma estação fluviométrica que registrou vazões sem a interferência de reservatórios a montante, possui uma área de drenagem de 375,79 km². As séries hidrológicas de entrada para a realização da modelagem hidrológica, na etapa de calibração e validação da 39155000, estão apresentadas no hidrograma da Figura 31. A vazão observada, utilizada para a determinação da vazão modelada, é provavelmente efeito dos escoamentos naturais na bacia, por conta da ausência de operações de reservatórios a montante.

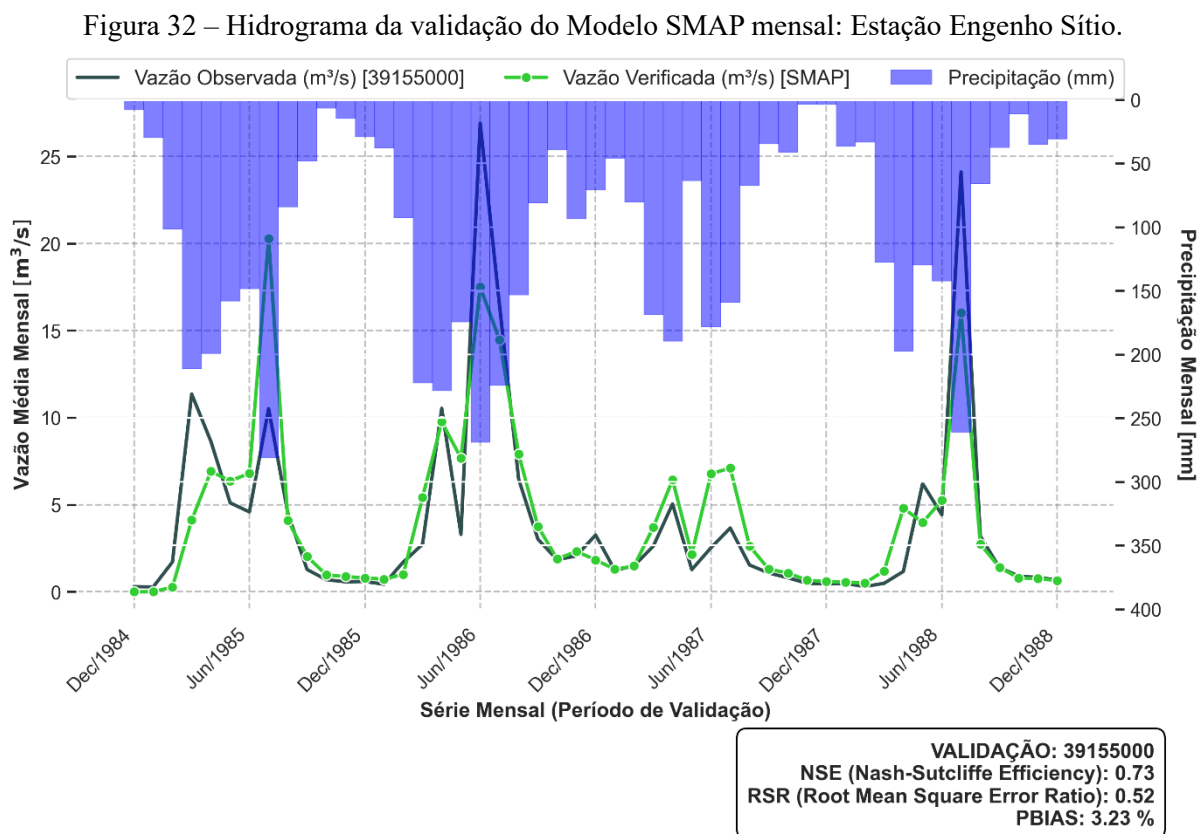
Figura 31 – Hidrograma das séries hidrológicas utilizadas no modelo SMAP mensal: Estação Engenho Sítio.



Fonte: Elaboração do Autor.

O período de validação teve um total de 4 anos de 12/1984 a 12/1988, sendo escolhido a partir da disponibilidade de dados desta estação, que começa a registrar vazões a partir do mês 05/1967. Os resultados da parametrização automatizada do modelo SMAP mensal na calibração são: Str= 400,00 mm; Pes= 2,21; Crec= 49%; Kkt= 6,00 meses e Ecof= 1,47. As métricas avaliativas na fase de validação apresentaram os seguintes valores: NSE= 0,73; RSR= 0,52 e PBIAS= 3,23 %. Os resultados das métricas indicam um bom desempenho do modelo na validação: o NSE e RSR refletem a precisão na reprodução da variabilidade temporal das

vazões, enquanto o PBIAS= 3,23 % mostra ausência de viés sistemático, confirmando a robustez da parametrização para o período analisado. A Figura 32, mostra o hidrograma de validação para a estação 39155000, onde podemos observar uma relativa aderência das vazões modeladas nas vazões observadas.

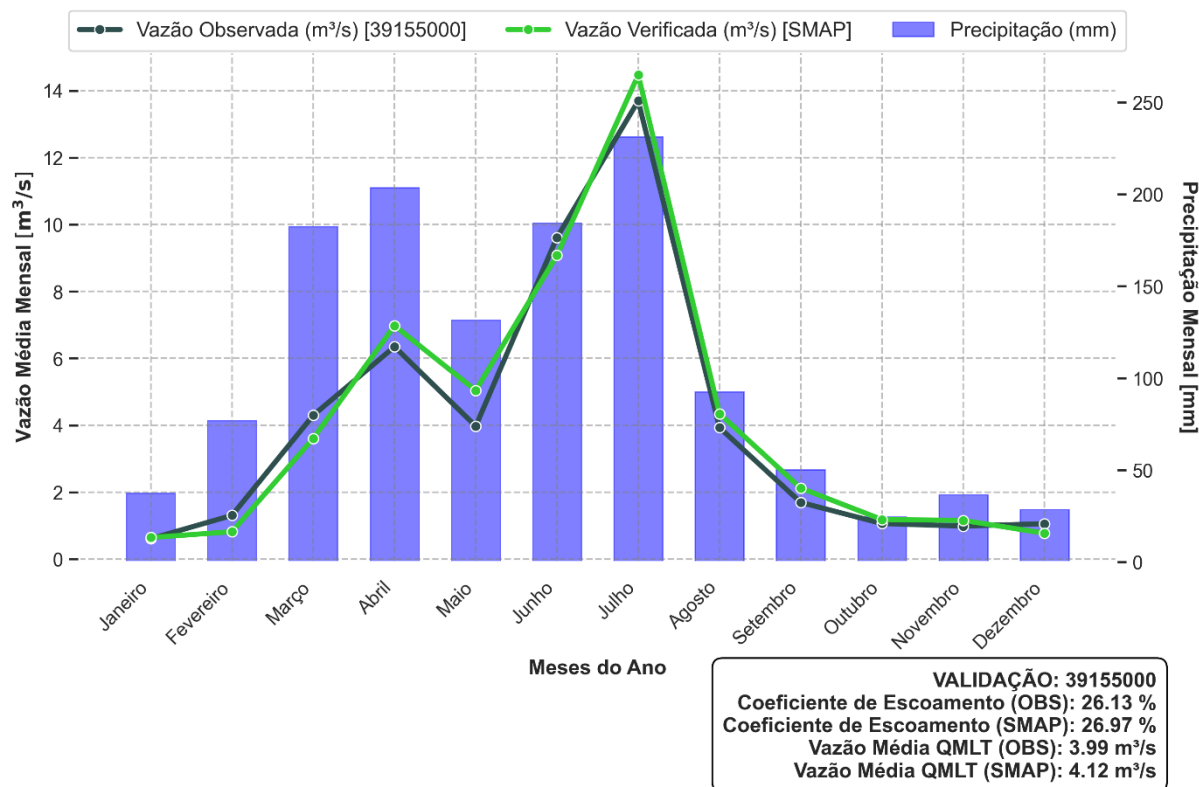


Fonte: Elaboração do Autor.

Como mostra a Figura 32, o modelo em alguns momentos superestima ou subestima as vazões médias mensais, o que fica evidente nos picos de vazões durante todos os meses mais chuvosos. Essa característica revela as dificuldades do modelo em representar os eventos extremos.

Na Figura 33, observamos a comparação das médias mensais fluviométricas das vazões modeladas e observadas para a estação 39155000, a vazão média de longo termo (QMLT) e o coeficiente de escoamento, são aproximadamente os mesmos, a comparação gráfica indica que o modelo conseguiu reproduzir adequadamente a distribuição sazonal das vazões.

Figura 33 – Comparação das vazões médias mensais na validação do Modelo SMAP mensal: Estação Engenho Sítio.



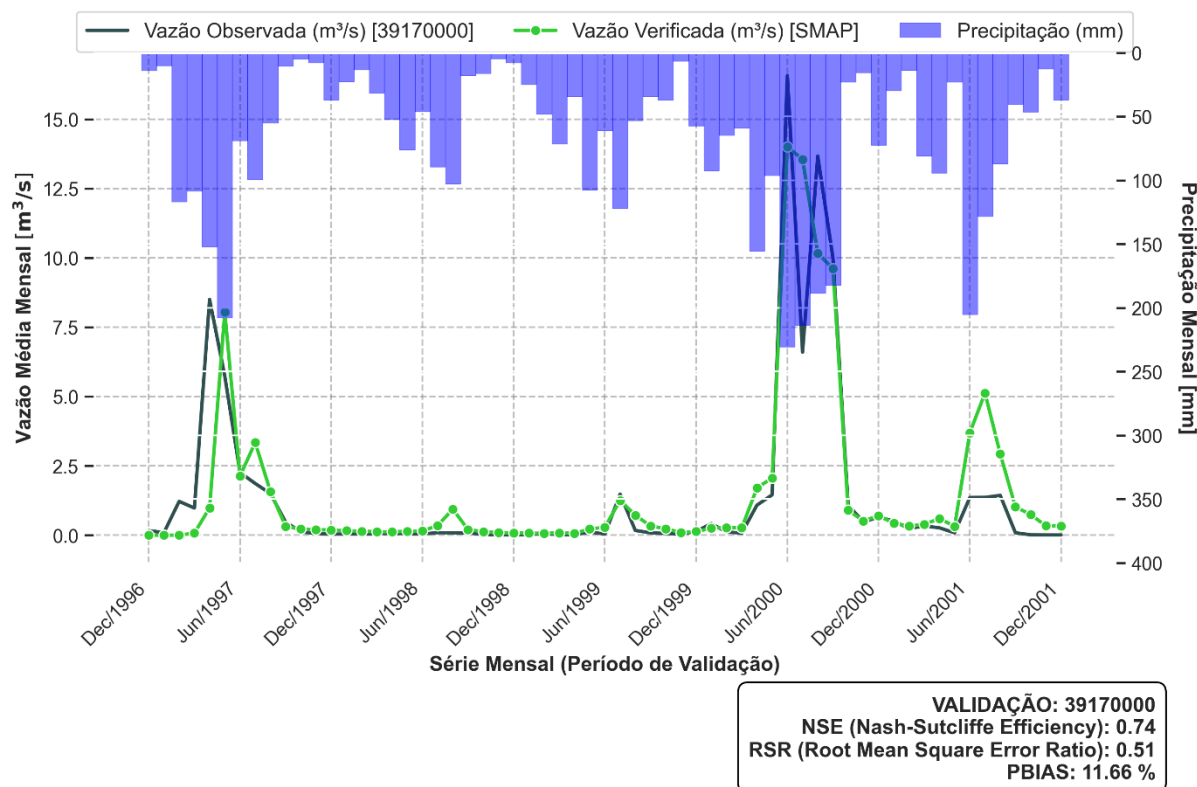
Fonte: Elaboração do Autor.

4.2.2 Análise da Validação: Estação Fluviométrica Vitória de Santo Antão (39170000)

A estação fluviométrica denominada Vitória de Santo Antão, com código identificador 39170000, apresentou os melhores resultados na fase de validação, das 2 estações localizadas no rio Tapacurá, afluente do rio Capibaribe, com localização em seção fluvial a montante do açude Tapacurá, sendo uma estação fluviométrica que registra vazões sem a interferência de reservatórios a montante, possui uma área de drenagem de 263,44 km², a menor do conjunto de estações fluviométricas estudadas.

As séries hidrológicas de entrada para a realização da modelagem hidrológica, na etapa de calibração e validação da 39170000, estão apresentadas no hidrograma da Figura 22, mostrada nas análises da calibração. A vazão observada, utilizada para a determinação da vazão modelada, é provavelmente efeito dos escoamentos naturais na bacia, por conta da ausência de operações de reservatórios a montante. A Figura 34, mostra o hidrograma de validação para a estação 39170000, onde podemos observar uma relativa aderência das vazões modeladas nas vazões observadas.

Figura 34 – Hidrograma da validação do Modelo SMAP mensal: Estação Vitória de Santo Antão.

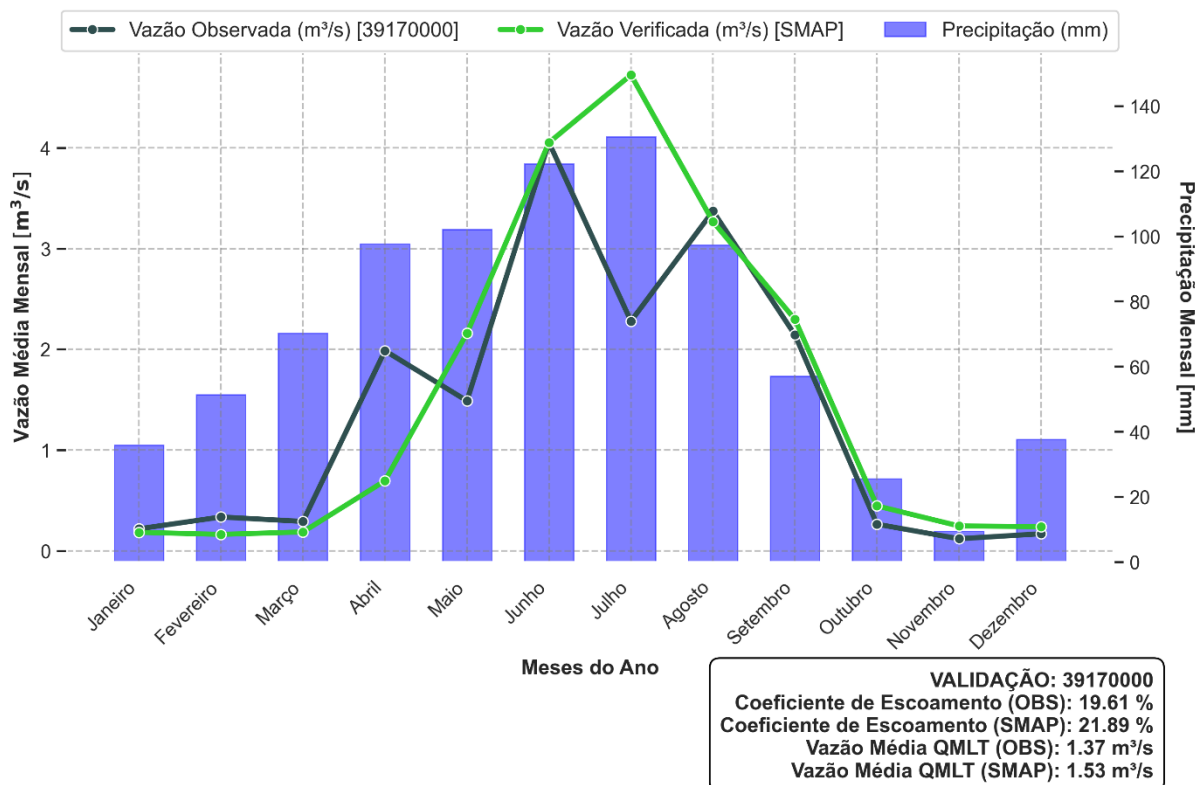


Fonte: Elaboração do Autor.

O período de validação teve um total de 5 anos de 12/1996 a 31/12/2001, sendo escolhido a partir da disponibilidade de dados desta estação, que começa a registrar vazões a partir do mês 04/1967. Os resultados da parametrização automatizada do modelo SMAP mensal na calibração são: Str= 400,00 mm; Pes= 5,58; Crec= 6,44%; Kkt= 6,00 meses e Ecof= 0,77. As métricas avaliativas na fase de validação apresentaram os seguintes valores: NSE= 0,74; RSR= 0,51 e PBIAS= 11,66 %. Os resultados das métricas indicam um bom desempenho do modelo na validação: o NSE e RSR refletem a precisão na reprodução da variabilidade temporal das vazões, enquanto o PBIAS= 11,66 % mostra um viés considerável do modelo em superestimar as vazões médias mensais.

Como mostra a Figura 34, o modelo em alguns momentos superestima ou subestima as vazões médias mensais, o que fica evidente nos picos de vazões durante os meses mais chuvosos, como nos eventos ocorridos de 06/2001 a 12/2001. Essa característica revela as dificuldades do modelo em representar os eventos extremos. Na Figura 35, observamos a comparação das médias mensais fluviométricas das vazões modeladas e observadas para a estação 39170000, a vazão média de longo termo (QMLT) e o coeficiente de escoamento, são aproximadamente os mesmos, a comparação gráfica indica que o modelo conseguiu reproduzir razoavelmente a distribuição sazonal das vazões.

Figura 35 – Comparação das vazões médias mensais na validação do Modelo SMAP mensal: Estação Vitória de Santo Antão.



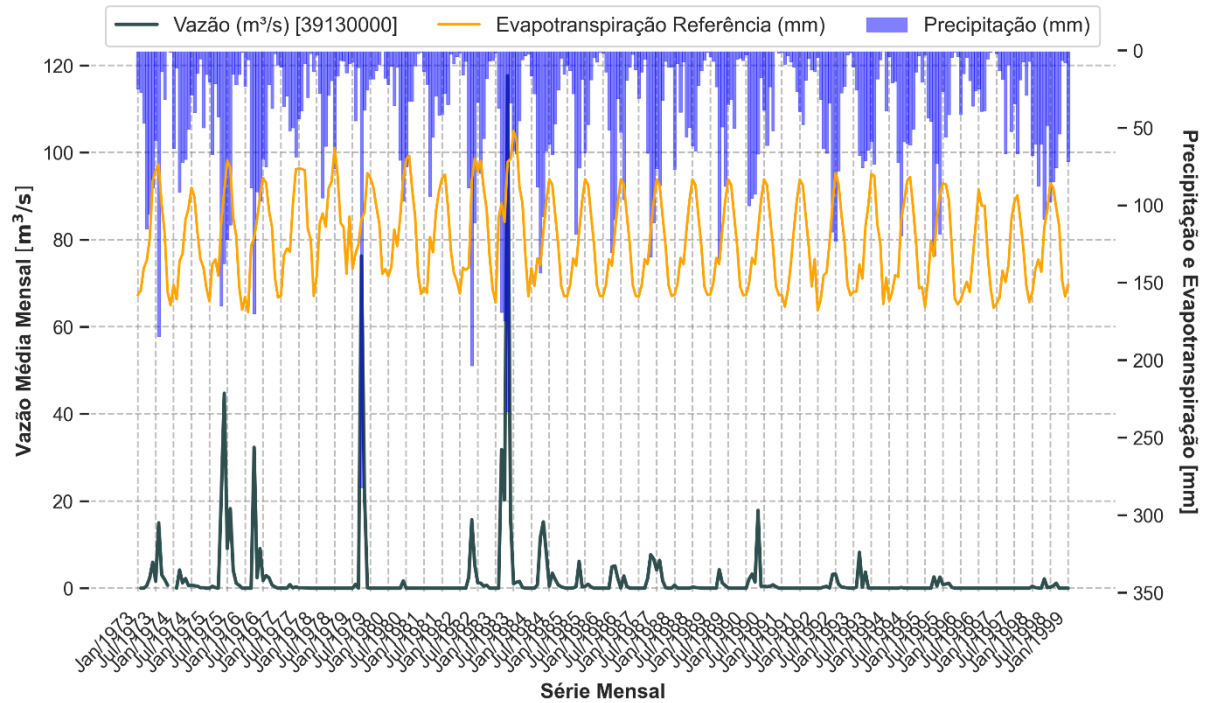
Fonte: Elaboração do Autor.

4.2.3 Análise da Validação: Estação Fluviométrica Toritama (39130000)

A estação fluviométrica denominada Toritama, com código identificador 39130000, apresentou os piores resultados do conjunto de estações na fase de validação, sendo a segunda mais próxima da cabeceira da do rio Capibaribe, possui uma área de drenagem de 2453,53 km², estando localizada em seção fluvial a jusante dos açudes Poço Fundo e Eng. Gercino Pontes. As séries hidrológicas de entrada para a realização da modelagem hidrológica, na etapa de calibração e validação da estação 39130000, estão apresentadas no hidrograma da Figura 36.

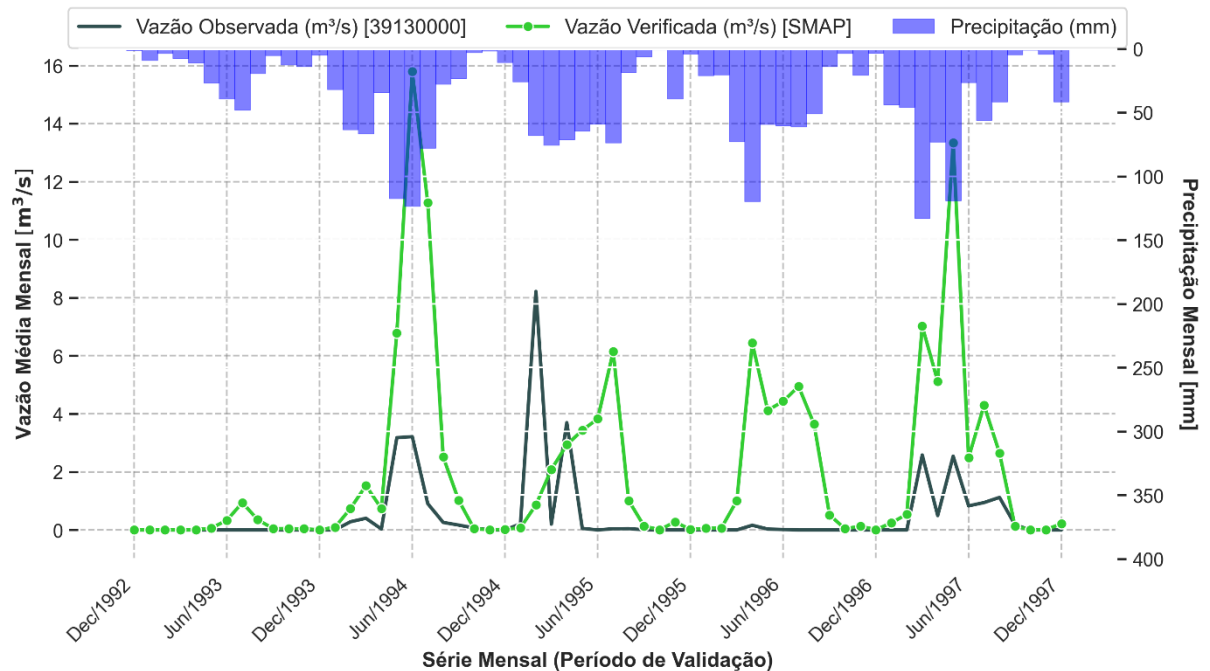
Desde 1987, A vazão observada registrada na estação, utilizada para a determinação da vazão modelada, é provavelmente efeito da combinação dos escoamentos naturais na bacia e dos escoamentos controlados e regularizados pela operação dos reservatórios Poço Fundo no rio principal e Eng. Gercino Pontes em um afluente. A Figura 27, mostra o hidrograma de validação para a estação 39130000, onde podemos observar uma baixa ou nenhuma aderência das vazões modeladas nas vazões observadas.

Figura 36 – Hidrograma das séries hidrológicas utilizadas no modelo SMAP mensal: Estação Toritama.



Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 37 – Hidrograma da validação do Modelo SMAP mensal: Estação Toritama.

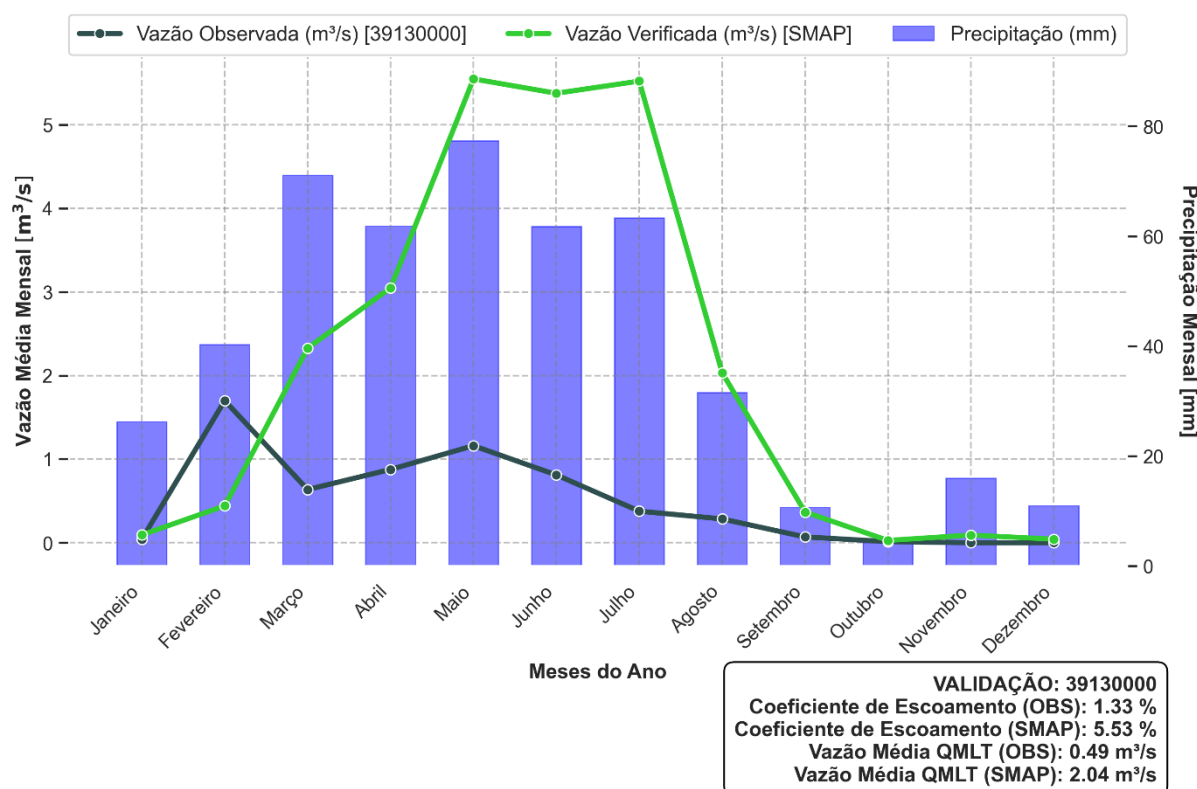


VALIDAÇÃO: 39130000
 NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency): -5.69
 RSR (Root Mean Square Error Ratio): 2.59
 PBIAS: 317.43 %

Fonte: Elaboração do Autor.

Na Figura 38, observamos a comparação das médias mensais fluviométricas das vazões modeladas e observadas para a estação 39130000, a vazão média de longo termo (QMLT) e o coeficiente de escoamento. Os resultados indicam uma grande diferença entre os valores médios dos dados modelados e observados, a variabilidade temporal está completamente distinta entre as séries analisadas, indicando que o modelo não conseguiu reproduzir a distribuição sazonal das vazões.

Figura 38 – Comparação das vazões médias mensais na validação do Modelo SMAP mensal: Estação Toritama.

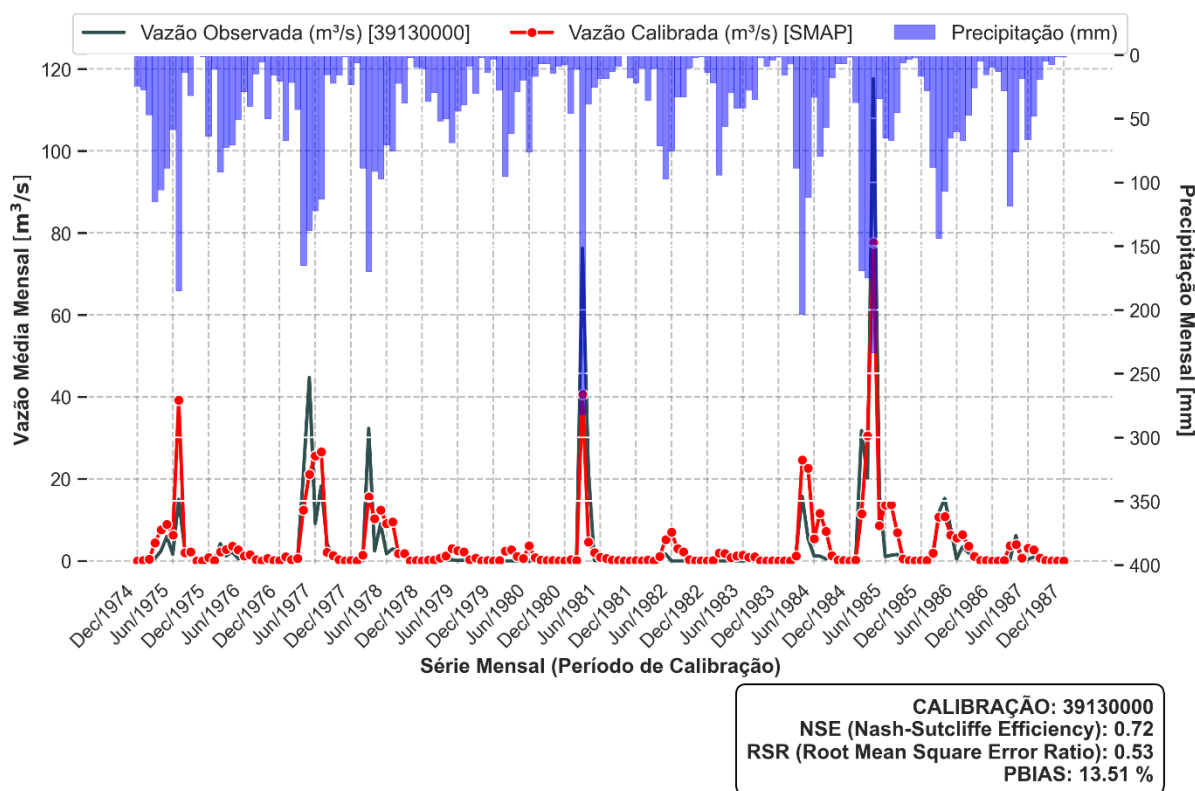


Fonte: Elaboração do Autor.

A estação fluviométrica Toritama (39130000) apresentou bons resultados na etapa de calibração, realizada entre 12/1974 e 12/1987, com os valores das 3 métricas avaliativas classificadas como “Bom”, sendo NSE= 0,72, KRS= 0,53 e PBIAS= 13,51 %, como mostrado na Figura 39. Contudo, na etapa de validação, realizada entre 12/1992 e 12/1997, apresentou os piores resultados de todas as estações. A calibração foi realizada num período com baixa ou nenhuma influência dos reservatórios no controle dos escoamentos. Diante disso, como explicado, existem diversas razões para o desempenho ruim do modelo na fase de validação, analisando o hidrograma da Figura 36, verificamos que o regime fluviométrico muda drasticamente entre os períodos de calibração e validação, o que pode estar relacionado com a interferência dos reservatórios na vazão a partir de 1987, sobretudo no amortecimento da vazão

nos períodos mais úmidos. Sendo que, essa característica apresentada da série fluviométrica analisada dificulta o processo de validação, quando a calibração e validação são realizadas em regimes fluviométricos distintos.

Figura 39 – Hidrograma da calibração do Modelo SMAP mensal: Estação Toritama.



4.3 ANÁLISE GERAL DO DESEMPENHO DO MODELO SMAP MENSAL

A avaliação geral do modelo SMAP mensal foi realizada conforme discutido na metodologia de aplicação do modelo estudado, considerando-se no mínimo 16 anos de dados observados de vazão média mensal, o dobro de anos processados na calibração, empregando as séries contínuas de precipitação e evapotranspiração de referência média mensal, oriundas do aplicativo HecIMS. A análise geral foi realizada com o objetivo de testar os parâmetros obtidos na etapa de calibração em uma série mais longa de dados observados, esse período inclui os períodos da calibração e validação mais outros não utilizados nesses processos.

Essa terceira abordagem avaliativa é fundamental pois permite verificar a eficácia do modelo em condições climáticas variáveis, incluindo períodos de seca e cheia distintos dos ocorridos na calibração e validação. Além disso, a análise de uma série histórica mais extensa possibilita identificar com mais precisão os eventuais sobreajustes dos parâmetros, garantindo que o modelo mantenha consistência em diferentes cenários hidrológicos. Por fim, a validação

em longo prazo pode reforçar a confiabilidade do SMAP para previsões e gestão de recursos hídricos, verificando se as simulações representam adequadamente a dinâmica real das bacias hidrográficas estudadas. Os resultados da etapa de análise de longo prazo, para as estações fluviométricas dos 3 rios (Capibaribe, Goitá, Tapacurá) da bacia hidrográfica do rio Capibaribe estão organizados na Tabela 18. Nesta tabela, estão descritas as datas dos períodos analisados, a quantidade de dados fluviométricos empregados, os parâmetros calibrados do modelo SMAP mensal (Str, Pes, Crec, Kkt, Ecof). Além disso, os resultados das métricas avaliativas para essa fase de análise do desempenho do modelo estão mostrados com a classificação qualitativa dessas, conforme Moriasi et al. (2007).

De maneira geral, o modelo SMAP, na sua versão mensal, apresentou desempenho variado, com bom ajuste para algumas estações e dificuldades em outras, sendo satisfatório ou bom em algumas estações, mas insatisfatório em outras, especialmente nas que apresentaram valores negativos ou muito baixos de NSE e valores elevados de PBIAS. Além disso, a análise de desempenho do modelo com uma maior quantidade de dados observados apresentou melhores resultados que a fase de validação com dados observados de 4 a 5 anos, como mostra a Figura 40, que mostra a quantidade de estações para cada classe das métricas avaliadas.

Figura 40 – Resultado geral da avaliação de desempenho do modelo SMAP mensal.

Etapas de Avaliação de Desempenho	Métricas Avaliadas	Muito Bom	Bom	Satisfatório	Insatisfatório	Total de Estações
Calibração	NSE	 4	 5	 0	 1	10
Validação		 1	 2	 2	 5	10
Análise geral		 1	 5	 1	 3	10
Calibração	RSR	 4	 5	 0	 1	10
Validação		 1	 2	 2	 5	10
Análise geral		 1	 5	 1	 3	10
Calibração	PBIAS	 8	 2	 0	 0	10
Validação		 2	 1	 2	 5	10
Análise geral		 4	 1	 1	 4	10

Fonte: Elaboração do Autor.

As 5 estações fluviométricas: São Lourenço da Mata II (rio Capibaribe), Engenho Canavieira (rio Goitá), Paudalho (rio Capibaribe), Salgadinho (rio Capibaribe) e Vitória de Santo Antão (rio Tapacurá) mostraram os melhores resultados, sendo que essas obtiveram classificação de desempenho “Boa” em pelo menos 2 das 3 métricas avaliadas, e não obtiveram resultados insatisfatórios, podemos verificar os hidrogramas dessas da Figura 41 a Figura 45. Contudo, 2 estações fluviométricas apresentaram resultados completamente insatisfatórios, sendo essas: Santa Cruz do Capibaribe (rio Capibaribe) e Engenho Bela Rosa I (rio Tapacurá), com hidrogramas na Figura 48 e Figura 50, respectivamente.

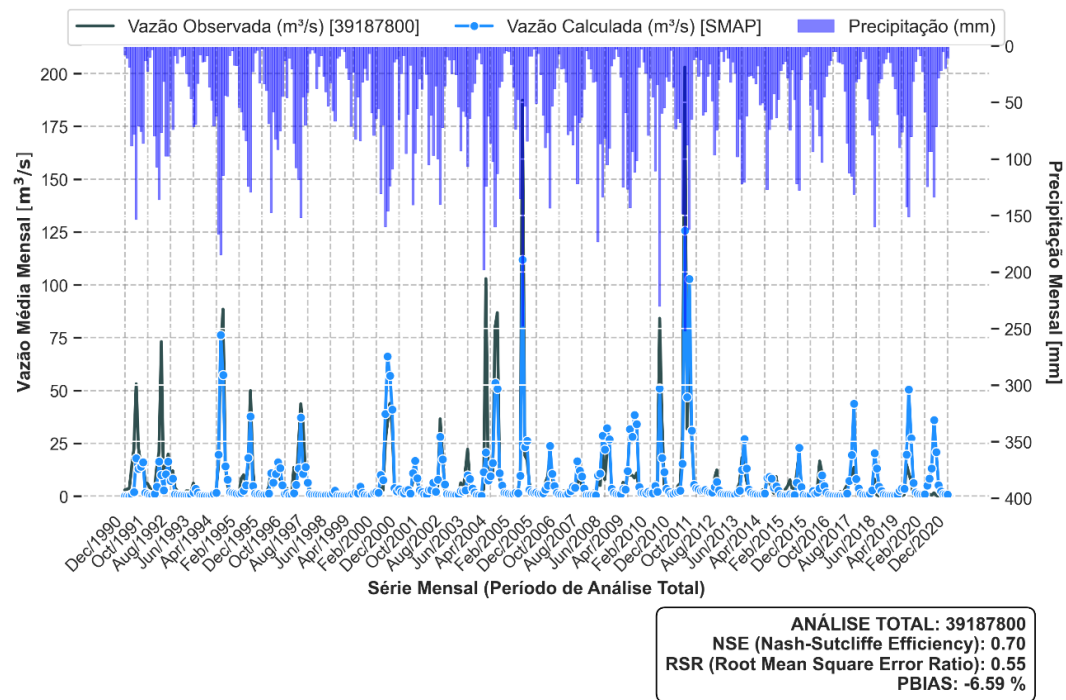
Tabela 18 – Resultados da etapa de avaliação geral do modelo SMAP mensal.

Avaliação do Modelo SMAP Mensal	Estações Fluviométricas Analisadas na Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe									
Nome do Rio	CAPIBARIBE						GOITÁ		TAPACURÁ	
Código da Estação	39100000	39130000	39140000	39145000	39150000	39187800	39154000	39155000	39170000	39180000
Nome da Estação	SANTA CRUZ DO CAPIBARIBE	TORITAMA	SALGADINHO	LIMOEIRO	PAUDALHO	SÃO LOURENÇO DA MATA II	ENGENHO CANAVIEIRA	ENGENHO SÍTIO	VITÓRIA DE SANTO ANTÃO	ENGENHO BELA ROSA I
Início da Análise	12/1987	12/1974	12/1984	12/1974	12/1966	12/1990	12/2002	12/1967	12/1985	12/1967
Fim da Análise	12/2006	12/2000	12/2005	12/2004	12/1995	12/2020	12/2023	12/1990	12/2002	12/1993
Dados (anos)	19	26	21	29	23	29	20	16	16	19
SMAP Str (mm)	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	468,42	1364,77	400,00	400,00	400,00
SMAP Pes (ad.)	2,62	2,08	2,78	2,21	2,49	2,91	1,97	2,21	5,58	3,20
SMAP Crec (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,94	0,00	49,00	6,44	0,00
SMAP Kkt (meses)	5,19	3,54	1,55	3,70	5,48	6,00	2,75	6,00	6,00	1,00
SMAP Ecof (ad.)	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,47	0,77	0,83
Métrica NSE (ad.)	0,17	0,68	0,72	0,59	0,67	0,70	0,71	0,44	0,85	0,16
Métrica RSR (ad.)	0,91	0,57	0,53	0,64	0,58	0,55	0,54	0,75	0,38	0,91
Métrica PBIAS (%)	53,64	40,46	22,15	42,71	-13,18	-6,59	7,09	-6,87	9,13	53,48
Classificação NSE	Insatisfatório	Bom	Bom	Satisfatório	Bom	Bom	Bom	Insatisfatório	Muito Bom	Insatisfatório
Classificação RSR	Insatisfatório	Bom	Bom	Satisfatório	Bom	Bom	Bom	Insatisfatório	Muito Bom	Insatisfatório
Classificação PBIAS	Insatisfatório	Insatisfatório	Satisfatório	Insatisfatório	Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Insatisfatório

Fonte: Elaboração do Autor.

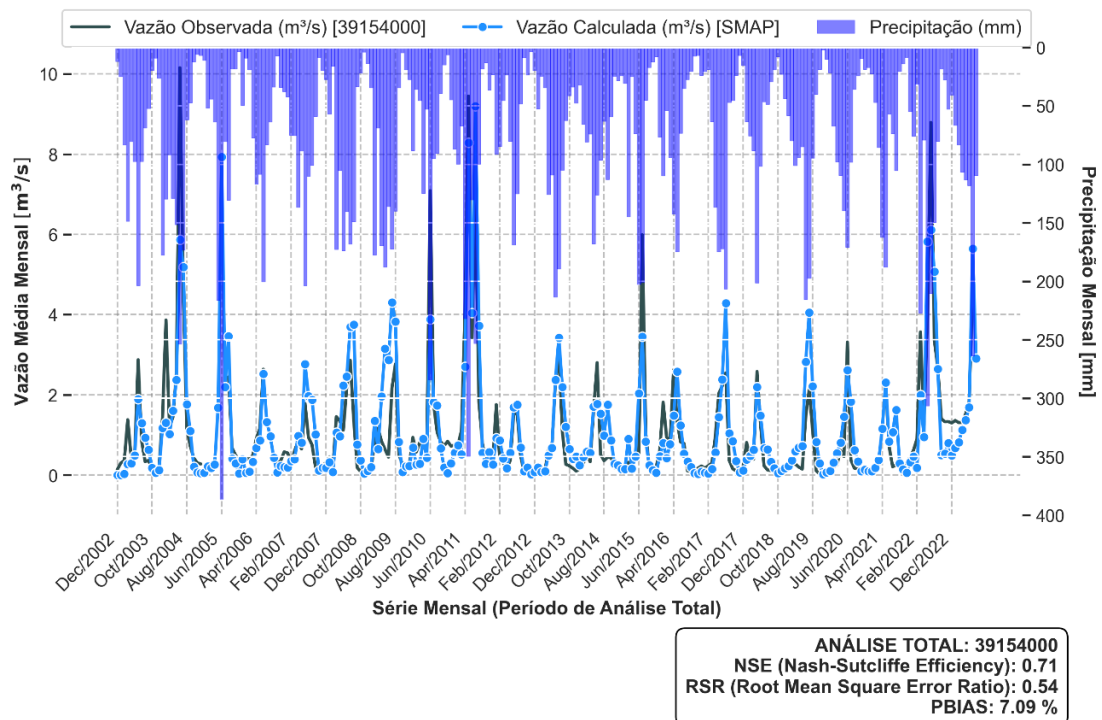
As outras 3 estações fluviométricas: Toritama (rio Capibaribe), Limoeiro (rio Capibaribe) e Engenho Sítio (rio Goitá) apresentaram resultados insatisfatórios em pelo menos 1 das 3 métricas avaliadas, podemos verificar os hidrogramas dessas na Figura 46, Figura 47 e Figura 51, respectivamente.

Figura 41 – Hidrograma de avaliação geral do Modelo SMAP mensal: Estação São Lourenço da Mata II.



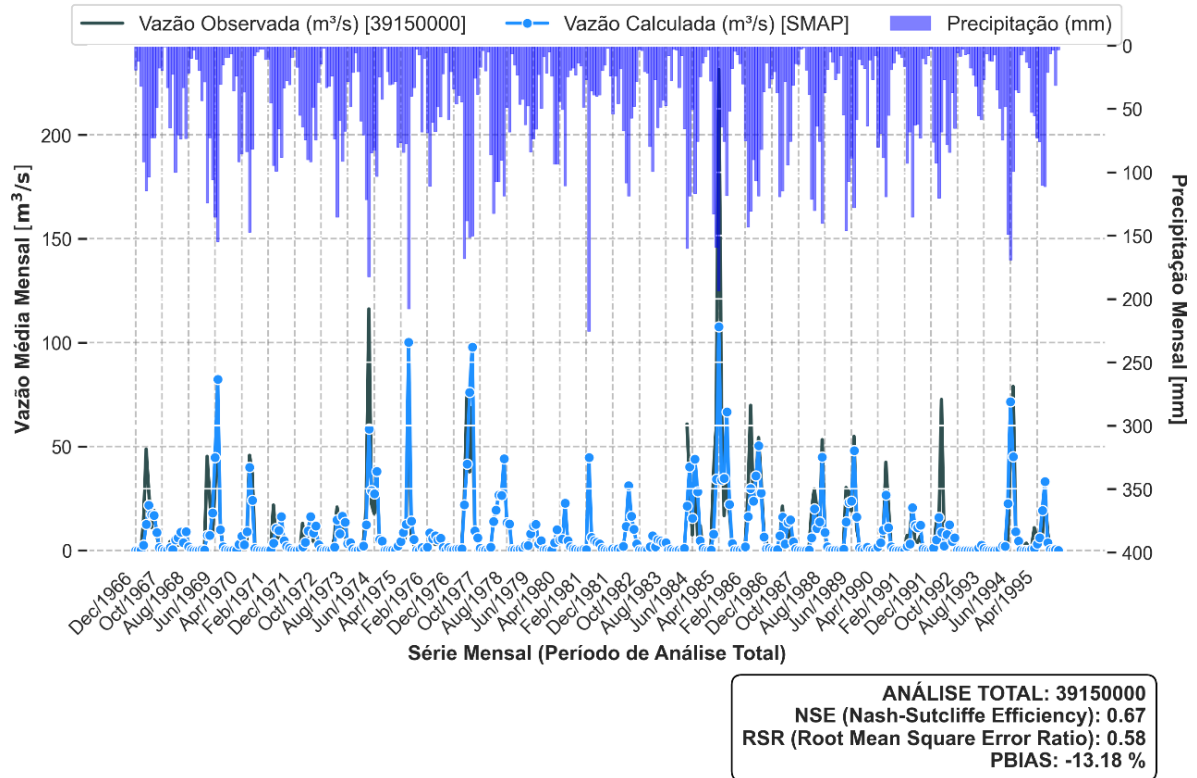
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 42 – Hidrograma de avaliação geral do Modelo SMAP mensal: Estação Engenho Canaveira.



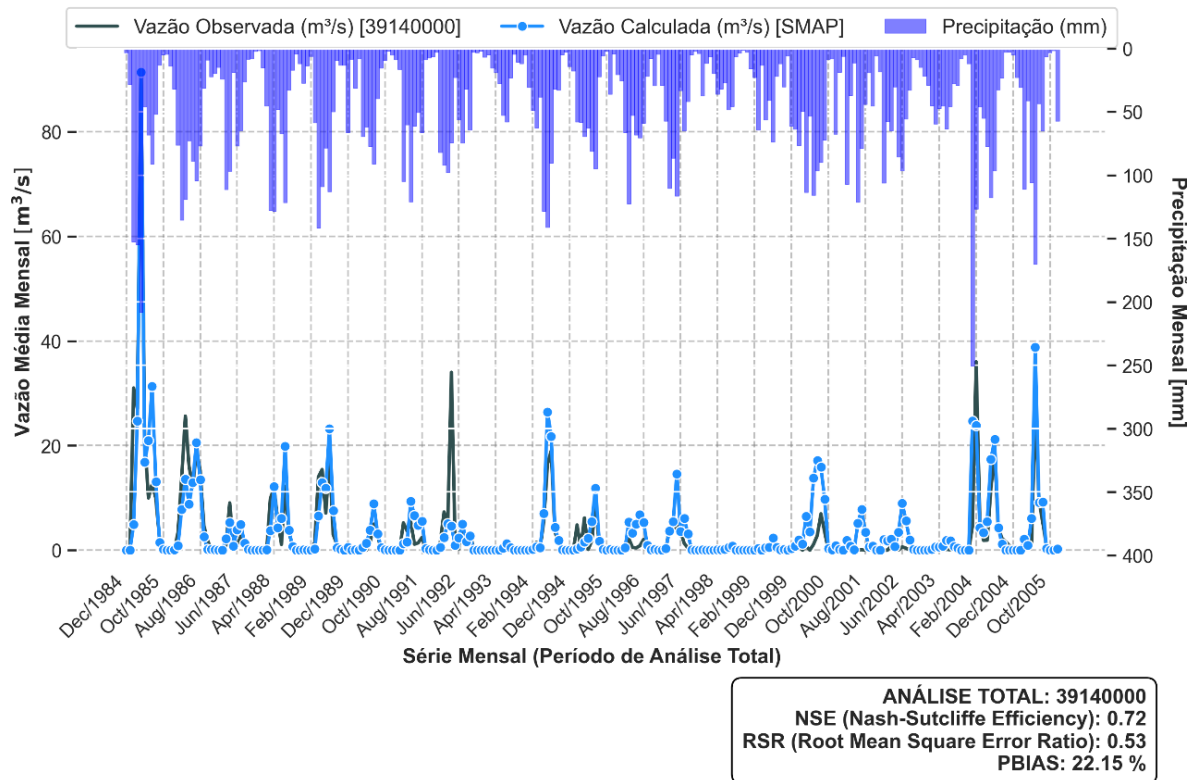
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 43 – Hidrograma de avaliação geral do Modelo SMAP mensal: Estação Paudalho.



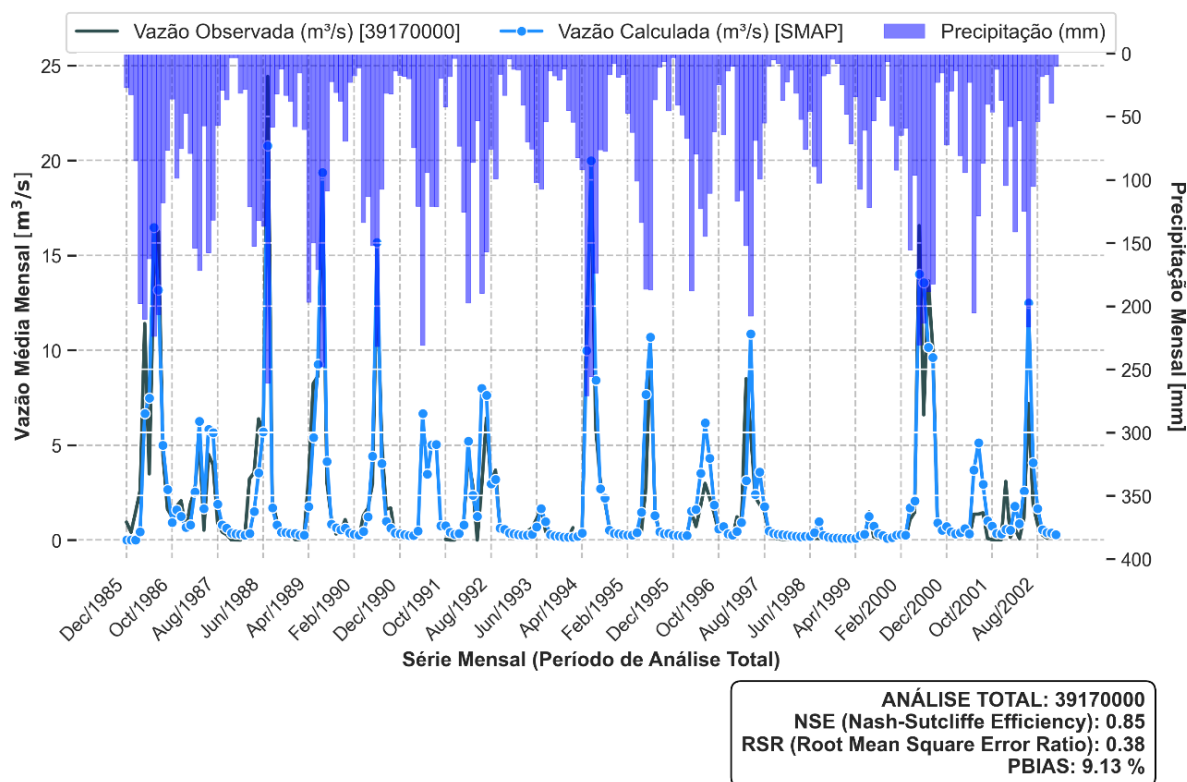
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 44 – Hidrograma de avaliação geral do Modelo SMAP mensal: Estação Salgadinho.



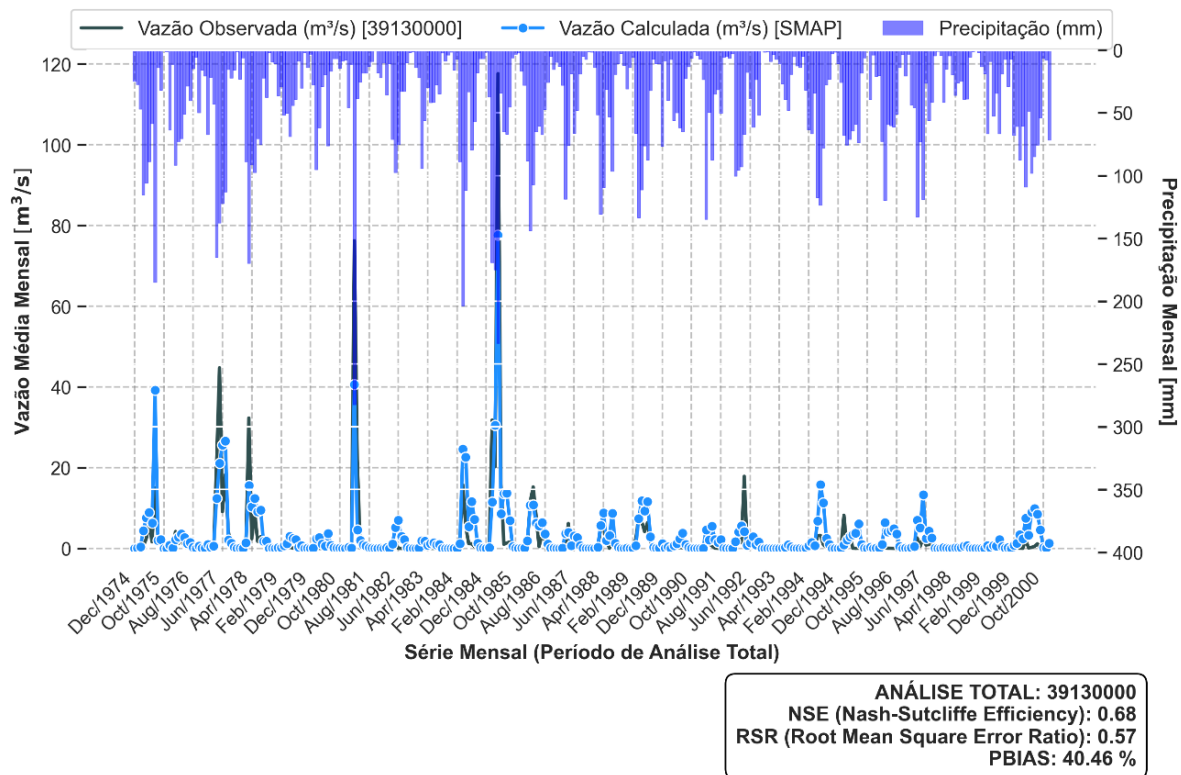
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 45 – Hidrograma de avaliação geral do Modelo SMAP mensal: Estação Vitória de Santo Antão.



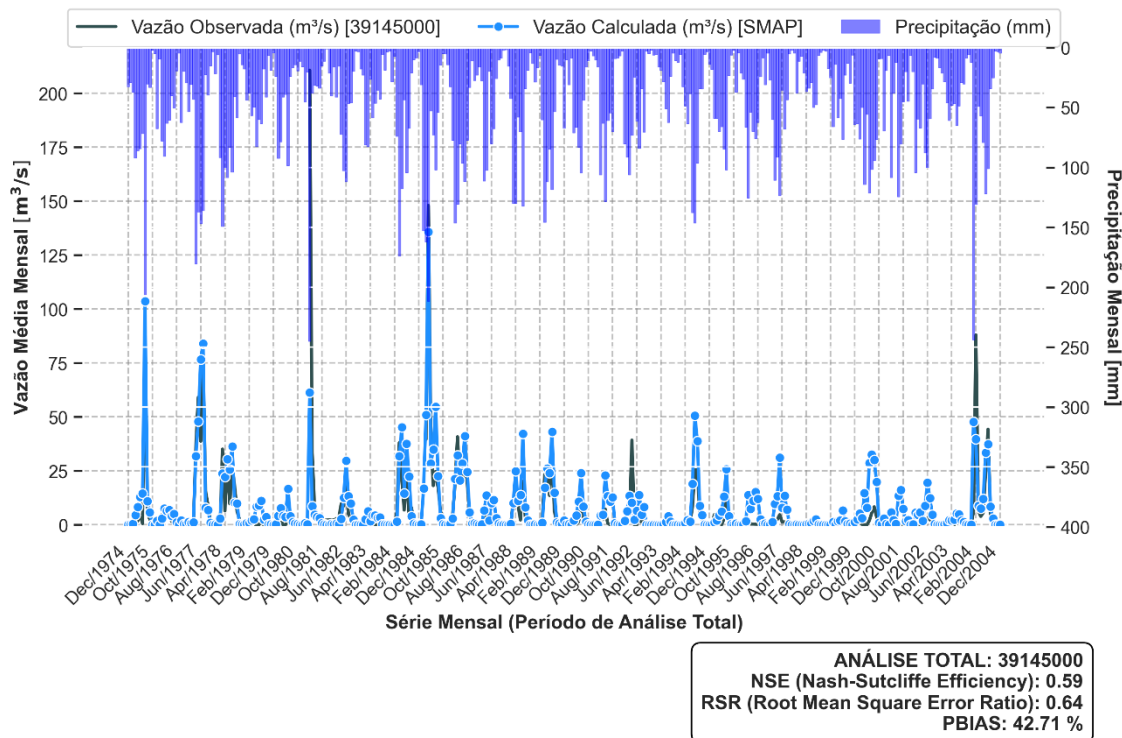
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 46 – Hidrograma de avaliação geral do Modelo SMAP mensal: Estação Toritama.



Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 47 – Hidrograma de avaliação geral do Modelo SMAP mensal: Estação Limoeiro.

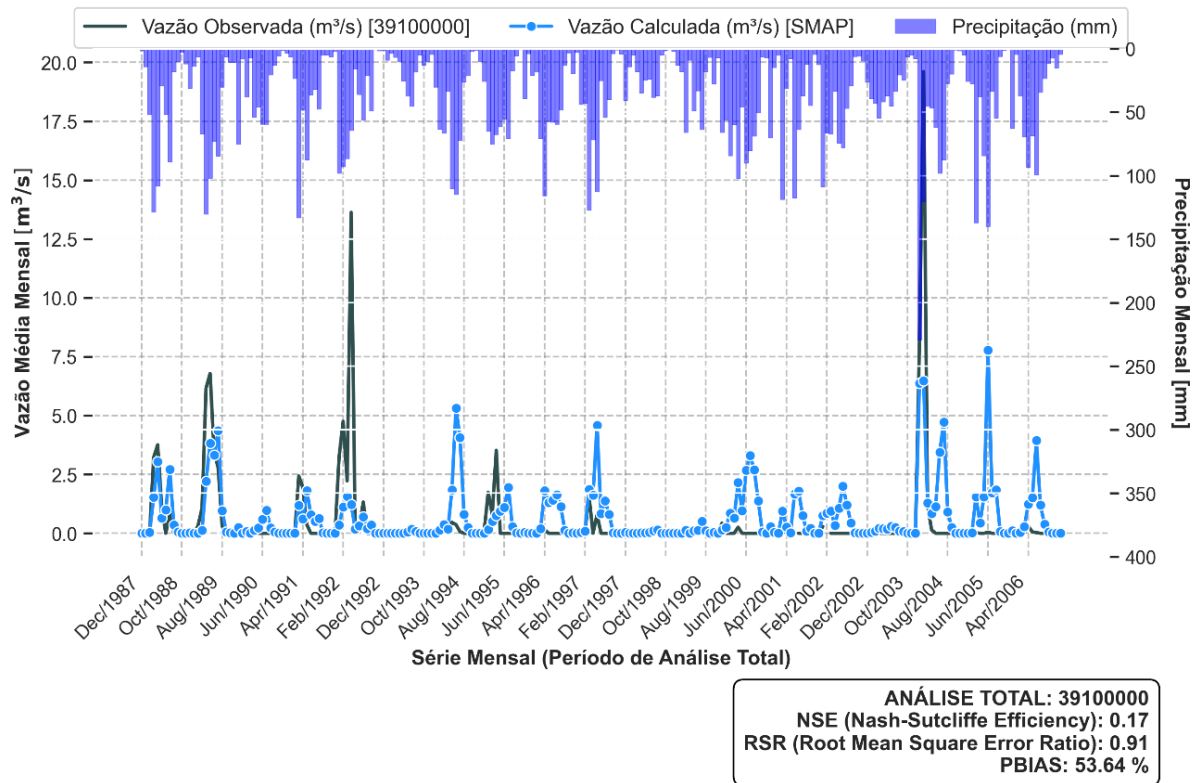


Fonte: Elaboração do Autor.

O desempenho do modelo avaliado como insatisfatório nas 2 estações fluviométricas citadas pode estar relacionado a diversas causas. A estação Santa Cruz do Capibaribe apresentou desempenho ruim em todas as etapas avaliativas, o que sugere problemas com a qualidade dos dados hidrometeorológicos processados e empregados na modelagem e/ou com os dados de vazão observada, esse último possivelmente prejudicado pelos barramentos a montante ou outros fatores que contribuíram para possíveis erros no registro dos dados observados.

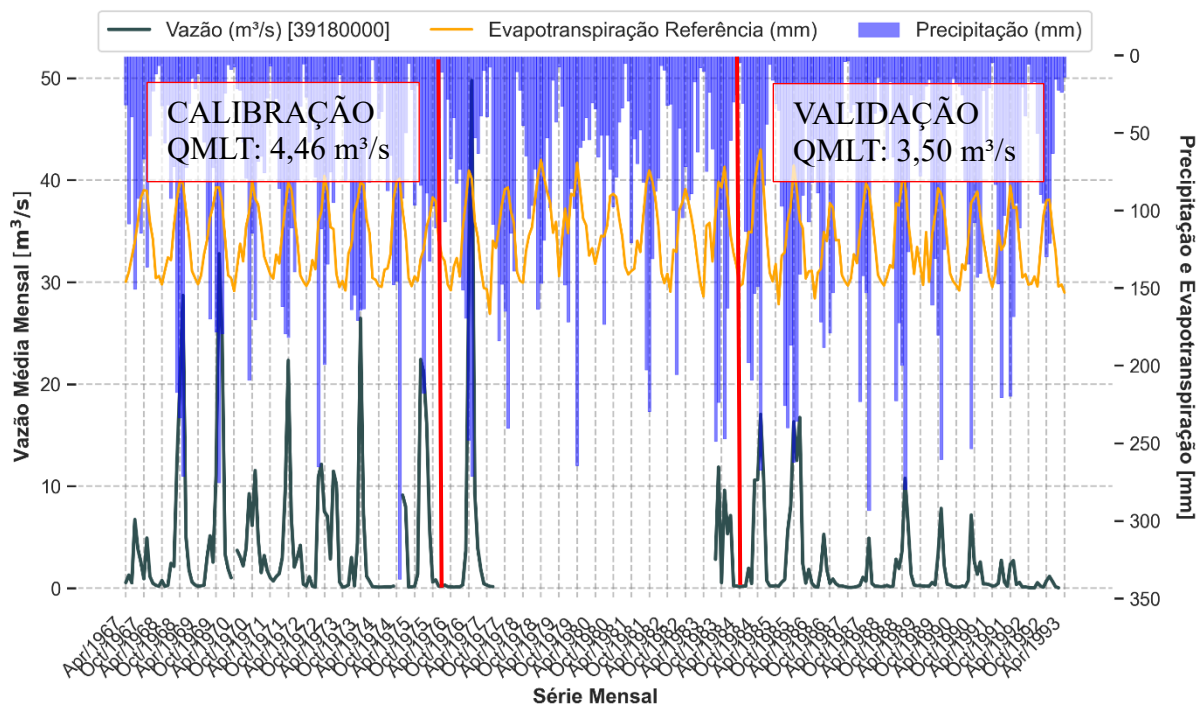
A estação Engenho Bela Rosa I apresentou bons resultados na etapa de calibração, mas resultados insatisfatórios na validação e análise geral, o que sugere sobreajustes do modelo na calibração e possíveis mudanças do regime fluviométrico entre os períodos de calibração e validação, como mostrado na Figura 49. O período de calibração foi realizado entre 12/1967 e 12/1975, nesse intervalo não existiam barramentos a montante da estação. Porém, no período de validação realizado entre 12/1984 e 12/1989 já estava em operação o açude Tapacurá com 94,20 hm³ de capacidade, construído em 1978. Este fato, mostra a possível razão para as alterações das características de variabilidade e magnitude do escoamento entre os períodos analisados.

Figura 48 – Hidrograma de avaliação geral do Modelo SMAP mensal: Estação Santa Cruz do Capibaribe.



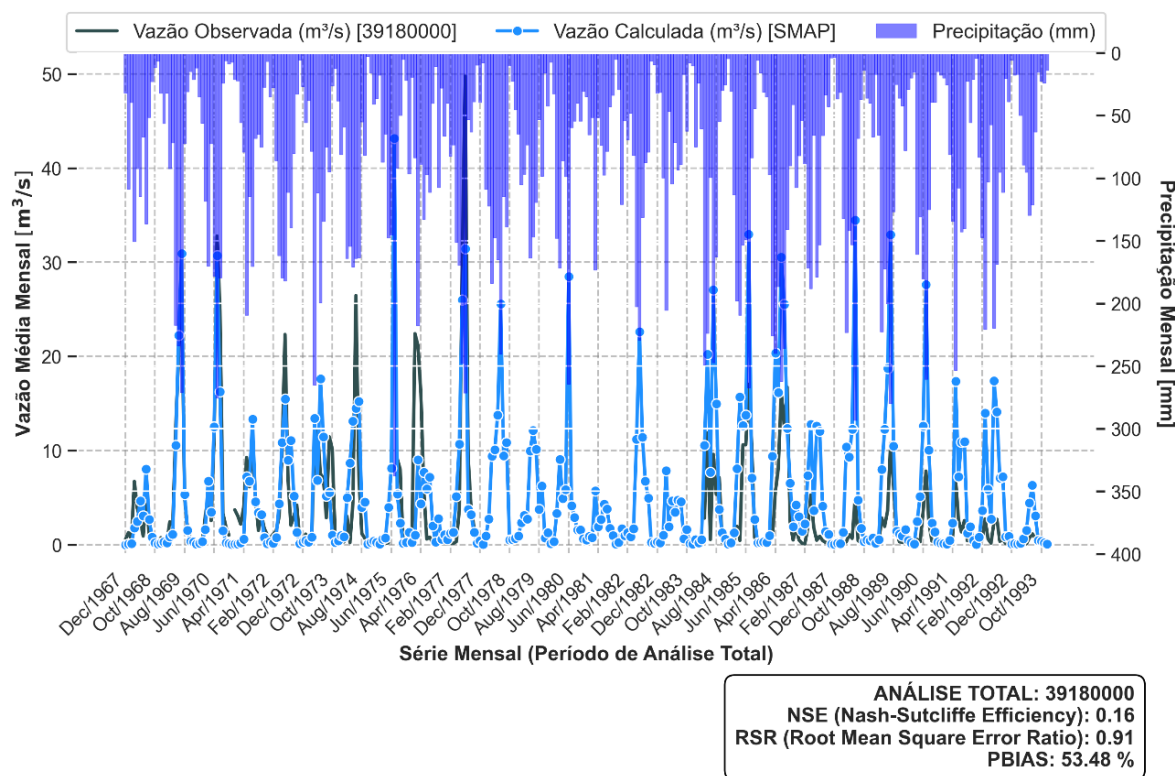
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 49 – Hidrograma das séries hidrológicas utilizadas no modelo SMAP mensal: Estação Engenho Bela Rosa I.



Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 50 – Hidrograma de avaliação geral do Modelo SMAP mensal: Estação Engenho Bela Rosa I.

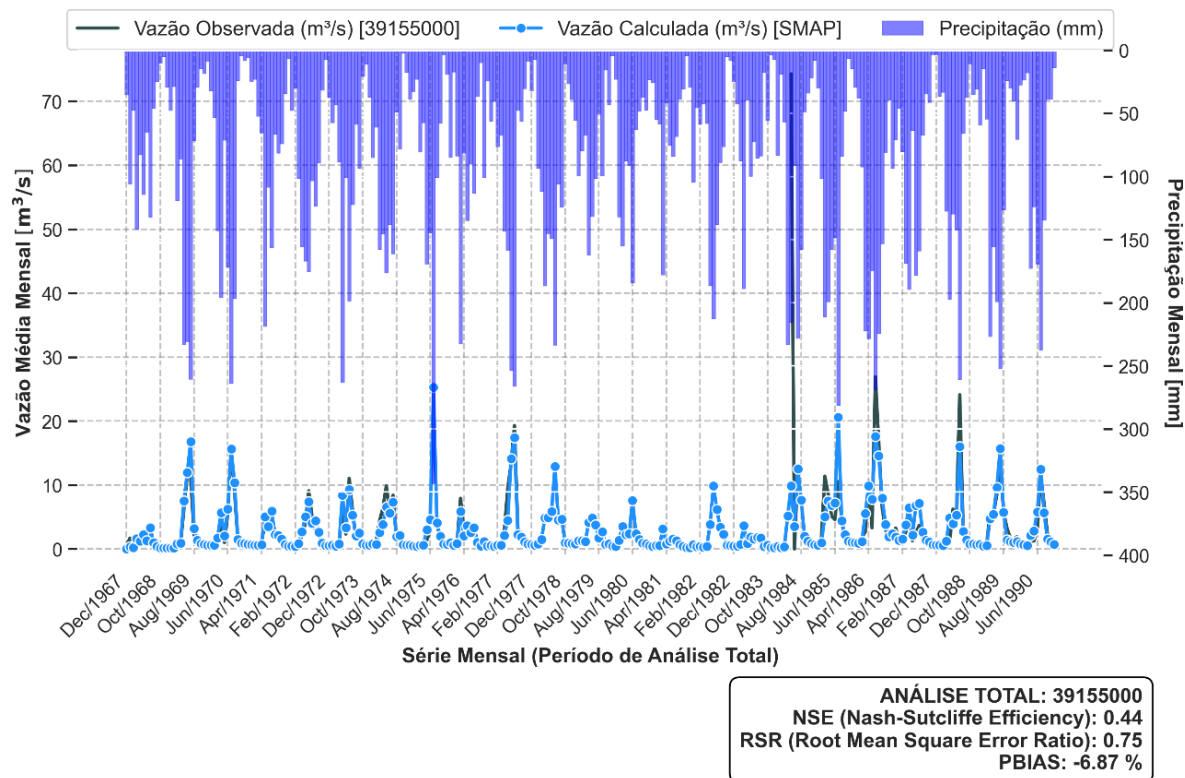


Fonte: Elaboração do Autor.

A estação fluviométrica Salgadinho (rio Capibaribe) apresentou melhoras nos resultados entre as etapas de validação para a de análise geral do desempenho do modelo SMAP mensal, enquanto a estação Engenho Sítio (rio Goitá) apresentou pioras nos resultados. Este fato demonstra que a avaliação de desempenho do modelo hidrológico é também influenciada pelo período de dados que está sendo analisado, sendo que dependendo dos dados do recorte temporal escolhido, o modelo pode apresentar resultados positivos ou negativos, sobretudo se esse recorte não for pertencente do período de calibração, onde foram definidos os parâmetros ótimos do modelo analisado.

A discrepância no desempenho do modelo SMAP mensal entre as estações Salgadinho (rio Capibaribe) e Engenho Sítio (rio Goitá), com melhora na primeira e piora na segunda ao se comparar a validação com a análise geral, evidencia que a avaliação de modelos hidrológicos é fortemente influenciada pelo recorte temporal escolhido. Períodos curtos, como os de 8 anos para a calibração, 4 anos para a validação, podem ser insuficientes para representar a variabilidade hidrológica de longo prazo, especialmente em bacias sujeitas a eventos extremos (secas ou cheias atípicas) ou mudanças do regime fluviométrico. No caso de Engenho Sítio, por exemplo, a janela de análise geral pode ter coincidido com anos hidrológicamente anômalos, outliers, erros nos registros das vazões. Já em Salgadinho, a análise prolongada provavelmente incorporou padrões mais estáveis ou relacionados com aqueles apresentados na calibração.

Figura 51 – Hidrograma de avaliação geral do Modelo SMAP mensal: Estação Engenho Sítio.



Fonte: Elaboração do Autor.

Um ponto interessante a ser abordado é que as estações fluviométricas com desempenho classificado como “Bom” ou “Muito Bom” nas 3 métricas avaliadas na análise geral, sendo essas estações: São Lourenço da Mata II (rio Capibaribe), Engenho Canavieira (rio Goitá) e Paudalho (rio Capibaribe), Vitória de Santo Antão (rio Tapacurá) foram processadas em todos os períodos de calibração, validação e análise geral, em quase a totalidade do tempo, sem a presença de barramentos a montante no rio principal em que estavam localizadas como Vitória de Santo Antão (rio Tapacurá), Engenho Canavieira (rio Goitá) e Paudalho (rio Capibaribe) ou os açudes já estavam operando desde o início das séries analisadas na modelagem como São Lourenço da Mata II (rio Capibaribe).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema HecIMS apresentou bom desempenho e otimizou a execução dos dois primeiros objetivos específicos do estudo, que envolviam a delimitação das bacias hidrográficas das estações fluviométricas analisadas, bem como a determinação da precipitação e evapotranspiração de referência média mensal para essas bacias, confirmando a capacidade do HecIMS em integrar e processar dados ambientais, servindo como uma ferramenta auxiliar na modelagem hidrológica.

O estudo demonstrou que o modelo SMAP mensal apresenta capacidade variável de simulação da dinâmica fluvial na bacia hidrográfica do rio Capibaribe. De maneira geral, a fase de calibração apresentou bons resultados. A fase de validação evidenciou uma degradação no desempenho do modelo em relação à calibração. A análise de longo prazo apresentou resultados mais satisfatórios que a fase de validação, por sua vez, reforçou a importância de testar o modelo em séries históricas mais extensas, permitindo identificar sua capacidade de generalização em diferentes cenários hidrológicos.

Nas análises realizadas, cinco estações fluviométricas se destacaram por apresentar bons resultados, sendo classificadas como “Boa” em pelo menos duas das três métricas avaliadas na avaliação geral do modelo SMAP mensal. Estas estações são: São Lourenço da Mata II (rio Capibaribe), Engenho Canavieira (rio Goitá), Paudalho (rio Capibaribe), Salgadinho (rio Capibaribe) e Vitória de Santo Antão (rio Tapacurá), as quais não apresentaram resultados insatisfatórios. Por outro lado, duas estações fluviométricas, Santa Cruz do Capibaribe (rio Capibaribe) e Engenho Bela Rosa I (rio Tapacurá), mostraram resultados totalmente insatisfatórios. As demais estações, Toritama (rio Capibaribe), Limoeiro (rio Capibaribe) e Engenho Sítio (rio Goitá), apresentaram resultados insatisfatórios em pelo menos uma das três métricas avaliadas.

Em síntese, o modelo SMAP mensal mostrou-se uma ferramenta útil para a simulação hidrológica na bacia do rio Capibaribe, mas com limitações que devem ser consideradas em futuras aplicações. Recomenda-se a incorporação de uma análise mais apurada da qualidade dos dados hidrometeorológicos e de vazões observadas para a exclusão de estações e de possíveis outliers, realizar análises de sensibilidade dos parâmetros para ajustar os limites de busca para a região, aplicar técnicas de validação do modelo mais robustas, que priorizem a análise de séries mais representativas, considerar as intervenções antrópicas dos barramentos para melhorar a precisão do modelo hidrológico e realizar estudos de regionalização dos

parâmetros para determina-los para as estações fluviométricas que não obtiveram resultados positivos nas etapas avaliativas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOTT, M. B.; BATHURST, J. C.; CUNGE, J. A.; O'CONNELL, P. E.; RASMUSSEN, J. An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, “SHE”, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. **Journal of Hydrology**, v. 87, n. 1-2, p. 45-59, 15 out. 1986.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop requirements. **Journal of Hydrology**, v. 285, p. 19-40, jan. 1998. FAO Irrig. Drain. Report Paper 56.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). Curva número na base Ottocodificada (1985, 2014 e 2022). **Nota Técnica nº 46/2018/SPR**. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/d1c36d85-a9d5-4f6a-85f7-71c2dc801a67>. Acesso em: 07 jan. 2025a.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Acesso em: 10 jan. 2025b.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). **Manual de procedimentos para instalação, operação e manutenção de estações fluviométricas**. Brasília: ANA, 2016.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). Massas d'Água. Nota Técnica nº 052/2020/SPR/ANA. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/7d054e5a-8cc9-403c-9f1a-085fd933610c>. Acesso em: 07 jan. 2025c.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). Índices e estatísticas hidrometeorológicas. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/6749d278-ca5e-40e9-b648-20d6382f57df>. Acesso em: 7 jan. 2025d.

APAC – AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. Bacias Hidrográficas - Rio Capibaribe. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/bacias-hidrograficas-rio-capibaribe/162-bacias-hidrograficas-rio-capibaribe/193-bacia-do-rio-capibaribe>. Acesso em: 7 jan. 2025a.

APAC – AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. Monitoramento: Reservatórios. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/monitoramento/190-monitoramento/526-reservatorios-2>. Acesso em: 7 jan. 2025b.

AGUIAR, F. G. **Estudo hidrométrico do Nordeste Brasileiro**. IFOCS, Rio de Janeiro, jan./mar. 1940. v. 13, n. 1.

ALEXANDRE, A. M. B.; MARTINS, E.; CLARKE, R. T.; REIS, D. S. Regionalização de parâmetros de modelos hidrológicos. Fortaleza: FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Chuvas Artificiais, 2005.

ALMEIDA, C. N. **Implantação de um sistema de apoio ao planejamento e gerenciamento de recursos hídricos na bacia do Rio do Peixe, com ênfase ao modelo de transformação chuva-vazão**. 2001. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista FAE**, Curitiba, v. 20, n. 1, p. 129-137, jan./jun. 2017.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. **Journal of the American Water Resources Association**, v.34, p.73-89, 1998.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 24, p. 43-69, 1979.

BEVEN, K. How far can we go in distributed hydrological modelling? **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 5, n. 1, p. 1–12, 2001.

BEVEN, K. **Rainfall-runoff modelling: the primer**. 2. ed. Chichester: Wiley-Blackwell, 2012.

BRASIL. Política Nacional de Recursos Hídricos. Lei n.º 9.433, de 8 de janeiro de 1997. [S.l.]: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos, 1997.

CÂMARA, R. K. C. et al. Modelagem hidrológica estocástica aplicada ao Rio Tocantins para a cidade de Marabá-PA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s.l.], v. 31, n. 1, p. 11-23, mar. 2016.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. 1. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013.

COLLISCHONN, W. et al. **Métodos simples para estimar vazões de referência e sua incerteza**. Porto Alegre, RS: ABRHidro, 2023.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. Simulação hidrológica de grandes bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.6, p.95-118, 2001.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Hidrología aplicada**. Santafé de Bogotá: McGraw-Hill, 1994

CHOU, C. M. Particle swarm optimization for identifying rainfall-runoff relationships. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 4, p. 115-126, mar. 2012.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Mapa de domínios e subdomínios hidrogeológicos do Brasil: águas subterrâneas: sistema de informações geográficas – SIG: escala 1:2.500.000. Rio de Janeiro, 2007.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Regionalização de vazões nas bacias hidrográficas brasileiras: estudo da vazão de 95% de permanência da sub-bacia 39. Bacias dos rios Capibaribe, Ipojuca, Una, Goiana, Mundaú, Paraíba, Coruripe, Pratagi, Sirinhaém, São Miguel, Camaragibe, Abilhai, Gramame e Manguaba.** Recife: CPRM, 2015.

DINIZ, L. S. **Regionalização de parâmetros do modelo chuva-vazão usando redes neurais.** 2008. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, 2008.

ESRI – ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. ArcGIS Enterprise. Disponível em: <https://enterprise.arcgis.com/en/server/latest/get-started/windows/what-is-arcgis-for-server-.htm> . Acesso em: 11 jan. 2025a.

ESRI – ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. ArcGIS Maps SDK for JavaScript. Disponível em: <https://developers.arcgis.com/javascript/latest/> . Acesso em: 11 jan. 2025b.

ESRI – ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. ArcGIS REST APIs. Disponível em: <https://developers.arcgis.com/rest/usersgroups-and-items/working-with-users-groups-and-items.htm>. Acesso em: 11 jan. 2025c.

FALLAH-MEHDIPOUR, E.; HADDAD, O. B.; MARÍÑO, M. A. MOPSO algorithm and its application in multipurpose multireservoir operations. **Journal Of Hydroinformatics**, [s.l.], v. 13, n. 4, p.794-811, 2011.

FERREIRA, P. S. **Modelagem hidrológica e climática para estimativa da disponibilidade hídrica em bacias hidrográficas do semiárido como subsídio para a gestão ambiental.** 2021. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Recife, 2021.

GAD, A.G. Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Application: A Systematic Review. **Archives of Computational Methods in Engineering**, 29, 2531-2561, 2022.

GARCIA, G. F. E. S.; SILVA, B. C. Ajuste do modelo SMAP para geração de vazões afluentes ao reservatório de Bico da Pedra. **Anais do V Simpósio de Iniciação Científica: Ciência, Tecnologia e Inovação no Brasil**, 2022.

GOODCHILD, M. F. Citizens as sensors: The world of volunteered geography. **GeoJournal**, v. 69, p. 211-221, 2007.

GORELICK, N. et al. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18-27, 1 dez. 2017.

GUPTA, H.V.; KLING, H.; YILMAZ, K.K.; MARTINEZ, G.F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling. **Journal of Hydrology**, v. 377, n. 1, p. 80-91, 2009.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. 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.

HIEZ, G. L'homogénéité des données pluviométriques. Cahiers ORSTOM. **Série Hydrologie**, Paris, v. 14, n. 2, p. 129-172, 1977.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Banco de dados e informações ambientais (BDiA): mapeamento de recursos naturais (MRN): escala 1:250 000: versão 2023: nota metodológica. Rio de Janeiro, 2023.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (BRASIL). Banco de Dados Meteorológicos do INMET. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 15 jan. 2025.

JUNIOR, A. D.; SILVEIRA, C. S.; COSTA, J. M. F.; GONÇALVES, S. T. N. Combining traditional hydrological models and machine learning for streamflow prediction. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 29, e11, 2024.

JÚNIOR, A. R. B. **Elementos de hidrologia aplicada**. São Paulo: Blücher, 2022.

KENNEDY, J. e EBERHART, R. 1995 Particle Swarm Optimization. **Proc. 4th IEEE Int. Conf. on Neural Networks**, IEEE, Piscataway, NJ, 1942 - 1948.

KLEMES, V. Operational testing of hydrological simulation models. **Hydrological Sciences Journal**, v.31, p.13-24, 1986.

KLING, H.; GUPTA, H. On the development of regionalization relationships for lumped watershed models: The impact of ignoring sub-basin scale variability. **Journal of Hydrology**, v. 373, n. 3-4, p. 337-351, jul. 2009.

KLING, Harald; FUCHS, Martin; PAULIN, Maria. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. **Journal of Hydrology**, v. 424–425, p. 264–277, 2012.

LEHNER, B.; VERDIN, K.; JARVIS, A. New global hydrography derived from spaceborne elevation data. Eos, Transactions, American Geophysical Union, v. 89, n. 10, p. 93-94, 2008.

LOPES, J. E. G. **Manual do modelo SMAP**. 1999. Disponível em: <http://pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id_arq=3596>. Acesso em: 10 jan. 2025.

LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. SMAP - A simplified hydrological model. In: SINGH, V. P. (Ed.). Applied modelling in catchment hydrology. **Water Resources Publications**, 1982.

LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. Simulação hidrológica: Aplicações de um modelo simplificado. **Anais do III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Fortaleza – CE, 1981.

LOURENÇO, A. M. G. et al. Análise e modelagem hidrológica no ambiente R. **Anais do XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, Natal – RN, 2014.

LOU, R. F. **Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do Rio Piabanha/RJ**. 2010. 174 f. Dissertação (Mestrado) – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

LUCAS, E. W. M. et al. Modelagem hidrológica determinística e estocástica aplicada à região hidrográfica do Xingu - Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s.l.], v. 24, n. 3, p. 308-322, set. 2009.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; LIEW, M. W. VAN; BINGER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v.50, p.885 - 900, 2007.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. **Journal of hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (BRASIL). Aplicação do modelo SMAP/ONS para previsão de vazões no âmbito do SIN. ONS 0097/2018-RV3. 2018.

OTSUKI, R. G.; REIS, D. S. Jr. Análise comparativa de metodologias de estimativa de séries de vazões médias mensais aplicadas a estudos de aproveitamentos hidrelétricos. **Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Maceió-AL, 2011.

PAIVA, A. E. D.; SILANS, A. M. B. P.; ALBUQUERQUE, D. J. S.; ALMEIDA, C. N. Aplicação do modelo hidrológico distribuído Açumod à bacia hidrográfica do rio Taperoá - Estado da Paraíba. **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Belo Horizonte-MG, 1999.

PERNAMBUCO. **Plano estadual de recursos hídricos de Pernambuco: tomo I: diagnósticos**. Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos. Recife: Seinfra, 2022.

PEREIRA, W. J. X. **Calibração de um modelo hidrológico de escala diária para bacias hidrográficas do semiárido cearense**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Fortaleza, 2017.

PEREIRA, D. R. **Simulação hidrológica na bacia hidrológica do rio Pomba usando o modelo SWAT**. 2013. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Viçosa, MG, 2013.

PROJETEC - BRLi. **Plano hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Capibaribe**: Tomo I - diagnóstico hidroambiental volume 01/03. Recife, 2010.

PYSWARM. Particle swarm optimization (PSO) with constraint support. Disponível em: <https://pythonhosted.org/pyswarm/>. Acesso em: 07 jan. 2025

PYTHON. Python Language Site: Documentation. 2025. Disponível em: <https://www.python.org/doc/>. Acesso em: 11 jan. 2025.

RAMPINELLI, C. G.; COSTA, M. G. Calibração do modelo chuva-vazão SMAP em uma estação do semiárido nordestino com os algoritmos PSO, AG e Nelder Mead e seus efeitos na definição das séries de vazões médias mensais. **Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Brasília-DF, 2015.

RENNÓ, C. D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas**. 2003. Tese (Doutorado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2003.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.10, n. 4, p. 05-18, 2005.

SILVA, U. R. S.; LUZ, L. D. Estudo de aplicabilidade do modelo hidrológico SMAP numa sub-bacia do Rio Itapicuru-Mirim/BA. **Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Brasília-DF, 2015.

SILVA, G. N. S. **Regionalização automatizada de parâmetros de modelos chuva-vazão integrada a um sistema de informações geográficas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, João Pessoa, 2012.

SOUZA, C. M. et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, 2020.

SOUSA, L. M. et al. Derivando características de escoamento usando processamento na nuvem e aplicativo web. **Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Aracaju-SE, 2023.

SOUZA, L. M.; SILVA, G. N. S.; REGO, A. M. S. Sistema computacional de informação e modelagem hidro-edafoclimática (HECIMS) para o Brasil. **Anais do XVII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, João Pessoa-PB, 2024.

SCHARDONG, A; SIMONOVIC, S. P.; GARCIA, J. I. B.; PORTO, R. L. Comparação de algoritmos evolutivos na calibração de modelo chuva-vazão - SMAP. **Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Campo Grande - MS, 2009.

SCHWARZBACH, M. S. R. **Estudo comparativo do comportamento hidrológico de bacias situadas na região Sul e no cristalino semiárido do Brasil, através do desenvolvimento do modelo MOHDAC: modelo hidrológico auto-calibrável**. 1988. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, 1988.

SUBRAMANYA, K. **Engineering Hydrology**. 4. ed. New Delhi: McGraw-Hill Education, 2017.

THIESSEN, A. H. Precipitation averages for large areas. **Monthly Weather Review**, [s.l.], v. 39, n. 7, p.1082-1089, jul. 1911. American Meteorological Society.

THEVENOT, A. Particle Swarm Optimization (PSO) Visually Explained: Medium, 2018. Disponível em: <https://medium.com/towards-data-science/particle-swarm-optimization-visually-explained-46289eeb2e14>. Acesso em: 7 jan. 2025.

TISIMST. Pyswarm: Particle Swarm Optimization (PSO) with constraint support. Disponível em: <https://github.com/tisimst/pyswarm/blob/master/pyswarm/ps0.py>. Acesso em: 07 jan. 2025.

TUCCI, C. E. M.; MENDES, C. A. **Avaliação ambiental integrada de bacia hidrográfica**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Qualidade Ambiental nos Assentamentos Humanos (SQA), 2006.

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora Universidade/UFRGS; ABRH, 2001. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 4).

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005. Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos-ABRH.

XU, C. **Hydrologic Models**. Uppsala: Uppsala University, 2002.