



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

LUTTEMBERG FERREIRA DE ARAÚJO

**USO DE MODELO CHUVA-VAZÃO CONCENTRADO
ESPACIALMENTE NA TRANSFERÊNCIA DE PARÂMETROS PARA
SUB-BACIAS ANINHADAS EM MESO REGIÕES HIDROGRÁFICAS:
ESTUDO DA BACIA AMAZÔNICA**

Recife

2024

LUTTEMBERG FERREIRA DE ARAÚJO

**USO DE MODELO CHUVA-VAZÃO CONCENTRADO
ESPACIALMENTE NA TRANSFERÊNCIA DE PARÂMETROS PARA
SUB-BACIAS ANINHADAS EM MESO REGIÕES HIDROGRÁFICAS:
ESTUDO DA BACIA AMAZÔNICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo

Recife

2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Araujo, Luttemberg Ferreira de.

Uso de modelo chuva-vazão concentrado espacialmente na transferência de parâmetros para sub-bacias aninhadas em meso regiões hidrográficas: estudo da bacia Amazônica / Luttemberg Ferreira de Araujo. - Recife, 2024.

143f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2024.

Orientação: José Almir Cirilo.

1. Modelagem hidrológica; 2. Modelo CAWM; 3. Satélite ERA 5; 4. Regionalização de parâmetros de modelagem hidrológica; 5. Modelo Chuva-Vazão. I. Cirilo, José Almir. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

LUTTEMBERG FERREIRA DE ARAÚJO

**USO DE MODELO CHUVA-VAZÃO CONCENTRADO
ESPACIALMENTE NA TRANSFERÊNCIA DE PARÂMETROS PARA
SUB-BACIAS ANINHADAS EM MESO REGIÕES HIDROGRÁFICAS:
ESTUDO DA BACIA AMAZÔNICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de Concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Almir Cirilo (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Prof. Dra. Leidjane Maria Maciel de Oliveira (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (CAA)

Prof. Dra. Simone Rosa da Silva (Examinador Externo)
Universidade de Pernambuco – UPE

Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE.

Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, cuja graça e orientação tornaram possível a vivência deste momento especial, trazendo alegria não só para mim, mas também para meus pais e todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, José Luciano e Maria Luciane, expresso minha profunda gratidão. Vocês desempenharam um papel fundamental na minha formação espiritual e intelectual, demonstrando paciência e confiança em mim mesmo nos momentos mais desafiadores. O seu apoio incondicional e amor foram verdadeiros pilares para o meu crescimento e sucesso. Às minhas irmãs, Layanne e Nataly, e ao meu sobrinho, Pedro Henrique, agradeço imensamente pelo amor e carinho constantes. Vocês estiveram ao meu lado em todos os momentos, oferecendo suporte e alegria que foram vitais em minha jornada. Ao meu noivo, Bruno Rafael, minha eterna gratidão. Sua presença constante, a crença firme em meus sonhos e o incentivo inabalável foram essenciais para que este momento se concretizasse.

Aos amigos que fiz ao longo deste curso, e àqueles que me acompanham desde a graduação, como Armando Duarte, Alice Almeida e Wendell Soares, José Neto e Joelithon Costa, meu sincero agradecimento pelo companheirismo, confiança e parceria inestimáveis. Cada um de vocês contribuiu de maneira significativa para esta jornada, e sou profundamente grato por ter tido a oportunidade de compartilhar momentos tão importantes com vocês. Gostaria de fazer um agradecimento especial a duas amigas que estiveram ao meu lado durante toda a pesquisa, Dênia Oliveira e Josielly Braz. O apoio de vocês foi fundamental, a troca constante de conhecimento e o companheirismo sincero foram essenciais para o sucesso deste trabalho.

A todos os professores que foram cruciais para o meu aprendizado, expresso minha sincera gratidão. Em especial, gostaria de agradecer aos que me acompanharam desde a graduação: Dr. Anderson Paiva, Dr. Saulo de Tarso e Dra. Sylvana Santos. Sou imensamente grato pelo valioso conhecimento que compartilharam e pelo impacto positivo que tiveram em minha formação. O comprometimento e a paixão de vocês pela educação não apenas enriqueceram meu percurso acadêmico, mas também serviram como uma fonte constante de inspiração para mim e para todos os alunos.

Em especial, gostaria de expressar minha profunda gratidão ao meu orientador, Professor Dr. Almir Cirilo. Agradeço sinceramente pela oportunidade, confiança e dedicação que você me ofereceu ao longo desta jornada. Sua atuação como um exemplo de pessoa e profissional foi verdadeiramente inspiradora. Seu amor pela pesquisa e sua capacidade de

motivar e inspirar seus alunos são admiráveis. Agradeço também pela sua paciência e calma constantes, sempre presentes em sua orientação. Tenho imenso orgulho de ter tido você como meu primeiro chefe em minha vida profissional, seu papel foi um divisor de águas para mim. Sou extremamente grato por todo o apoio e ensinamentos que recebi, e reconheço o impacto significativo que sua orientação teve em minha trajetória.

Por fim, gostaria de expressar minha sincera gratidão à Universidade Federal de Pernambuco, em especial ao Campus Caruaru (UFPE-CAA), a instituição onde tive a oportunidade de realizar minha graduação e concretizar um sonho que antes parecia distante. Destaco que o processo de interiorização do campus das Universidades desempenha um papel crucial nas conquistas de todos os jovens do interior, além de uma experiência enriquecedora e acessível. O CAA foi e sempre será para mim uma segunda casa. A convivência e o aprendizado proporcionados por esta instituição foram fundamentais para o meu crescimento pessoal e profissional. Sou profundamente grato por tudo o que a UFPE-CAA me ofereceu e pelas memórias e experiências que levo comigo.

RESUMO

A otimização da gestão dos recursos hídricos e a implementação eficaz de políticas públicas utilizam modelos matemáticos de simulação hidrológica, que são continuamente aprimorados. Entre eles, o Campus Agreste Watershed Model (CAWM). Este se destaca por sua simplicidade e ainda assim capacidade de representar com precisão os processos hidrológicos. O CAWM é um modelo chuva-vazão concentrado espacialmente, que foi idealizado com o objetivo primário de simular o escoamento superficial em bacias semiáridas. Este estudo inova na aplicação de uma versão modificada do modelo, simulando eventos chuva-vazão para bacia úmida de grande extensão, a Bacia Hidrográfica Amazônica, que possui uma extensão de 6,5 milhões de km². Além da análise de adequação e otimização do modelo para bacias dessa magnitude, busca-se realizar a transferência de valores dos parâmetros de bacia calibrada para bacias aninhadas. Para isso, a grande bacia foi dividida em cinco sub-bacias, além da bacia principal, sendo estas correspondentes aos rios: Tapajós, Solimões, Negro, Madeira e Xingú, afluentes com considerável contribuição de vazão para o curso d'água principal, o Amazonas. Além disso, foi realizada a divisão da sub-bacia do Rio Madeira em sub bacias aninhadas, a fim de refinar as simulações na respectiva sub-bacia. Para desenvolver a regionalização foram usados dados de registro do escoamento superficial obtidos do satélite ERA 5 para estimativa das perdas nas bacias objeto da regionalização. Os resultados da calibração e validação do CAWM para grandes bacias foram satisfatórios, com as métricas de desempenho demonstrando uma boa adequação do modelo e uma representação consistente dos fenômenos avaliados. As bacias dos rios Tapajós e Madeira apresentaram NSE superiores a 0,90, evidenciando alta precisão na validação do modelo. Os resultados da regionalização para as bacias do Rio Madeira, especificamente para as estações fluviométricas 1532 e 1563, destacam-se com valores de NSE globais de 0,87 e 0,94 e coeficiente angular derivado das equações de dispersão dos dados do satélite de 0,997 e 0,971, respectivamente, indicando uma excelente performance do CAWM, e evidenciando ótima correlação entre as variáveis e os dados das sub-bacias em relação à bacia principal evidenciados pelos dados do ERA 5. Dessa forma, o modelo CAWM apresentou boa performance na representação das variações de vazão em bacias complexas e extensas, demonstrando eficácia na adaptação e transferência de parâmetros durante a validação e regionalização.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica; Modelo CAWM; Satélite ERA 5; Regionalização de parâmetros de modelagem hidrológica; Modelo Chuva-Vazão.

ABSTRACT

The optimization of water resource management and the effective implementation of public policies utilize mathematical models for hydrological simulation, which have been developed and continuously improved. Among them is the Campus Agreste Watershed Model (CAWM), notable for its simplicity and ability to accurately represent hydrological processes. The CAWM is a spatially concentrated rainfall-runoff model designed primarily to simulate surface runoff in semi-arid basins. This study innovates by applying a modified version of the model to simulate rainfall-runoff events for the extensive wet basin of the Amazon River Basin, covering 6.5 million km². In addition to analyzing the adequacy and optimization of the model for basins of this magnitude, it aims to transfer calibrated basin parameter values to nested basins. In order to achieve this, the large basin was divided into five sub-basins corresponding to the rivers Tapajós, Solimões, Negro, Madeira, and Xingú, which significantly contribute to the main watercourse, the Amazon. Additionally, the Madeira River sub-basin was divided into nested sub-basins to refine the results of the simulations. Regionalization development used surface runoff data obtained from the ERA 5 satellite to estimate the losses in the basins under regionalization. Calibration and validation results for the CAWM in large basins were satisfactory, with performance metrics demonstrating good model adequacy and consistent representation of the evaluated phenomena. The Tapajós and Madeira river basins achieved NSE values above 0.90, indicating high precision in the model validation. The regionalization results for the Madeira River basins, specifically for gauging stations 1532 and 1563, highlighted global NSE values of 0.87 and 0.94, respectively, with angular coefficients from scatter plot equations of 0.997 and 0.971, indicating excellent CAWM performance and strong correlation between the variables and the sub-basin data relative to the main basin, as evidenced by ERA 5 data. Thus, the CAWM demonstrated good performance in representing flow variations in complex and extensive basins, showing effectiveness in parameter adaptation and transfer during validation and regionalization.

Keywords: Hydrological modeling; CAWM model; ERA 5 satellite; Regionalization of hydrological modeling parameters; Rainfall-Runoff model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura integral do SIG	27
Figura 2 - Especificidades da bacia hidrográfica em um SIG	28
Figura 3 - Representação do Modelo CAWM V	41
Figura 4 - Biomas brasileiros	47
Figura 5 - Média sazonal da reciclagem de precipitação sobre a América do Sul no período.	53
Figura 6 - Localização da bacia hidrográfica Amazônica	55
Figura 7 - Rede hidrográfica da Bacia Amazônica.....	56
Figura 8 - Postos pluviométricos Bacia Amazônica.....	59
Figura 9 - Postos fluviométricos localizados na extensão da Bacia Amazônica.....	60
Figura 10 - Fluxograma para geração das séries de dados hidrológicos	61
Figura 11 - Postos fluviométricos selecionados	62
Figura 12 - Divisão da Bacia Amazônica em sub-bacias.	63
Figura 13 - Distribuição espacial de estações de pluviométricas e fluviométricas	65
Figura 14 - Valores de Curve Number para o solo da Bacia Amazônica.....	68
Figura 15 - Fluxograma do modelo hidrológico CAWM.....	73
Figura 16 - Fluxograma de teste com os parâmetros de regionalização.....	76
Figura 17 - Hidrogramas de Calibração (a) e Validação (b) da bacia do Rio Amazonas	80
Figura 18 - Vazão média no período validação da bacia do Rio Amazonas.	81
Figura 19 - Hidrogramas de Calibração (a) e Validação (b) da bacia do Rio Madeira	83
Figura 20 - Vazão média no período validação da bacia do Rio Madeira.....	85
Figura 21 - Hidrogramas de Calibração (a) e Validação (b) da bacia do Rio Solimões	87
Figura 22 - Vazão média no período validação da bacia do Rio Solimões	88
Figura 23 - Hidrogramas de Calibração (a) e Validação (b) da bacia do Rio Negro	90
Figura 24 - Vazão Média no período validação-bacia do rio Negro	91
Figura 25 - Hidrogramas de Calibração (a) e Validação (b) da bacia do Rio Xingu	93
Figura 26 - Vazão média no período de validação da bacia do Rio Xingu	94
Figura 27 - Hidrogramas de Calibração (a) e Validação (b) da bacia do Rio Tapajós.....	96
Figura 28 - Vazão média no período validação da bacia do Rio Tapajós	97
Figura 29 - (A) Relação do escoamento entre a bacia principal e a sub-bacia. (B) Vazão Média no período total para a sub-bacia do Rio Madeira.....	101
Figura 30 - (A) Relação do escoamento entre a bacia principal e a sub-bacia. (B) Vazão média no período total para a sub-bacia do rio Solimões.	103

Figura 31 - (A) Relação do escoamento entre a bacia principal e a sub-bacia. (B) Vazão média no período total para a sub bacia do Rio Negro.	105
Figura 32 - (A) Relação do escoamento entre a bacia principal e a sub-bacia. (B) Vazão média no período total para a sub bacia do Rio Xingu.	107
Figura 33 - (A) Relação do escoamento entre a bacia principal e a sub-bacia. (B) Vazão Média no período total para a sub-bacia do Rio Tapajós.	109
Figura 34 - Delimitação das bacias aninhadas ao Rio Madeira.....	111
Figura 35 - (A) Relação do escoamento entre a bacia principal e a sub-bacia. (B) Vazão média no período total para a sub-bacia do Posto 1525.	114
Figura 36 - (A) Relação do escoamento entre a bacia principal e a sub bacia. (B) Vazão média no período total para a sub bacia do Posto 1532.	116
Figura 37 - (A) Relação do escoamento entre a bacia principal e a sub bacia. (B)Vazão média no período total para a sub bacia do Posto 1540.	118
Figura 38 - (A) Relação do escoamento entre a bacia principal e a sub bacia. (B) Vazão média no período total para a sub bacia do Posto 1563.	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros considerados e ajustáveis na calibração	78
Tabela 2 - Métricas de desempenho bacia do rio Amazonas	79
Tabela 3 - Métricas de desempenho da bacia do Rio Madeira	82
Tabela 4 - Métricas de desempenho da bacia do Rio Solimões	86
Tabela 5 - Métricas de desempenho da bacia do Rio Negro	89
Tabela 6 - Métricas de desempenho da bacia do Rio Xingu	92
Tabela 7 - Métricas de desempenho da bacia do Rio Tapajós.....	95
Tabela 8 - Parâmetros extraídos da bacia principal	98
Tabela 9 - Métricas de desempenho da bacia do Rio Madeira	100
Tabela 10 - Métricas de desempenho da bacia do Rio Solimões	102
Tabela 11 - Métricas de desempenho da bacia do Rio Negro	104
Tabela 12 - Métricas de desempenho-Bacia do rio Xingu	106
Tabela 13 - Métricas de desempenho da bacia do Rio Tapajós.....	108
Tabela 14 - Dados das bacias aninhadas do Rio Madeira	111
Tabela 15 - Dados considerados e calibrados da bacia principal (Posto 1570).....	112
Tabela 16 - Métricas de desempenho do Posto 1525	113
Tabela 17 - Métricas de desempenho do Posto 1532	115
Tabela 18 - Métricas de desempenho do Posto 1540	117
Tabela 19 - Métricas de desempenho do Posto 1563	120

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Categorização dos coeficientes de eficiência	33
Quadro 2 - Postos fluviométricos da bacia hidrográfica do rio Amazonas.	64
Quadro 3 - Dados dos postos de estudo.....	67
Quadro 4 - Valores de CN e S para cada sub-bacia estudada.....	69
Quadro 5 - Dados de evapotranspiração de referência para cada sub-bacia	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	HIPÓTESES	16
3	OBJETIVOS	17
3.1	OBJETIVO GERAL	17
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
4	REVISÃO DE LITERATURA	18
4.1	GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS	18
4.2	USO DE MODELOS HIDROLÓGICOS	19
4.4	GEOPROCESSAMENTO NA MODELAGEM HIDROLÓGICA	26
4.5	DADOS DE ENTRADA DE MODELOS HIDROLÓGICOS	30
4.6	MÉTRICAS DE DESEMPENHO	31
4.7	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS	33
4.8	TRANSFERÊNCIA DE PARÂMETROS ENTRE BACIAS ANINHADAS	34
4.9	MODELO CAWM	39
4.10	REGIÃO AMAZÔNICA	46
5	MATERIAIS E MÉTODOS	55
5.1	ÁREA DE ESTUDO	55
5.1.1	Principais Características Hidrometeorológicas	57
5.2	BASE DE DADOS	61
5.3	CÁLCULO DE PRECIPITAÇÃO MÉDIA	66
5.4	USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	67
5.5	DADOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO	69
5.6	ESCOAMENTO SUPERFICIAL	71
5.7	APLICAÇÃO DO MODELO CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL (CAWM)	73
5.8	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS	74

5.9	REGIONALIZAÇÃO DE PARÂMETROS.....	75
6	RESULTADO E DISCUSSÕES	78
6.1	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS HIDRÓLOGICOS	78
6.1.1	Calibração e validação da bacia do Rio Amazonas	78
6.1.2	Calibração e validação da bacia do rio Madeira.....	82
6.1.3	Calibração e validação da bacia do rio Solimões	85
6.1.4	Calibração e validação para a bacia do rio Negro	88
6.1.5	Calibração e validação para a bacia do rio Xingu	91
6.1.6	Calibração e validação para bacia do Rio Tapajós.....	94
6.2	TRANSFERÊNCIA DE PARÂMETROS (REGIONALIZAÇÃO)	98
6.2.1	Regionalização da bacia do rio Madeira.....	99
6.2.2	Regionalização da bacia do rio Solimões	102
6.2.3	Regionalização da bacia do rio Negro	104
6.2.4	Regionalização da bacia do rio Xingu.....	105
6.2.5	Regionalização da bacia do rio Tapajós.....	108
6.3	TRANSFERÊNCIA DE PARÂMETROS ENTRE AS BACIAS ANINHADAS DO RIO MADEIRA.....	110
6.3.1	Regionalização do Posto 1525	112
6.3.2	Regionalização do posto 1532	114
6.3.3	Regionalização do posto 1540	117
6.3.4	Regionalização do Posto 1563	119
7	CONCLUSÃO	122
8	RECOMENDAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS	124

1 INTRODUÇÃO

A água desempenha um papel fundamental para o planeta, influenciando o desenvolvimento social e econômico dos países (Naghdi et al., 2021). A sua importância está ligada a diversas atividades que só são passíveis de realização a partir do seu uso, como: consumo humano e animal, agropecuária, produção industrial e produção de energia. No Brasil, as atividades ligadas aos setores de energia e agropecuária exercem funções significativas, o que promove fortemente o uso da água. Além disso, cerca de um terço de toda água consumida no país é exportada, com destaque para o setor agropecuário, onde cerca de 88,79% dessa água ultrapassa o território nacional virtualmente (Montoya; Finamore, 2019). Diante disso, é evidente a importância da água como objeto de poder econômico e biológico, e assim sendo, devido aos seus usos múltiplos e a sua relevância nota-se que houve um aumento nos estudos relacionados a manutenção hídrica, que servem de embasamento para o gerenciamento das práticas dos recursos hídricos de forma eficiente e sustentável (Cavalcanti; Marques, 2019; Felinto; Ribeiro; Braga, 2019; Terzi; Dündar, 2020).

Desse modo, a gestão adequada da água é essencial para garantir um equilíbrio entre as necessidades humanas, econômicas e ambientais, promovendo o uso sustentável desse recurso vital para a vida no planeta (Arcova et al., 2020). Segundo Qi et al. (2022) a gestão sustentável da água não apenas preserva sua disponibilidade, como também contribui significativamente para a recuperação dos ecossistemas, a segurança alimentar e o desenvolvimento econômico a longo prazo. Diante da complexidade de controle e gerenciamento dos recursos hídricos, houve a necessidade da implementação de políticas e modelos de gestão que pudessem auxiliar nesse processo de inovação. Pois, mesmo nos países desenvolvidos, é essencial continuar avançando na concepção e implementação de políticas alinhadas com as metas globais de desenvolvimento sustentável. Isso não apenas beneficia esses países diretamente, mas também contribui para um futuro mais sustentável e equitativo para toda a humanidade (Tsani; Koundouri; Akinsete, 2020).

Segundo Silva, Hereros e Borges (2017), o Brasil vem ganhando destaque no que diz respeito a gestão e ao uso da água, e de forma gradual tenta enquadrar-se no modelo de GIRH (Gestão Integrada dos Recursos Hídricos). Contudo, ainda necessita avançar em ações pautadas em um ambiente mais participativo e descentralizado para desenvolver os instrumentos de gestão hídrica, com o objetivo de alcançar todas as regiões no território nacional. Vale destacar que no país a oferta e demanda de água varia drasticamente de região para região e de acordo com as atividades desenvolvidas, o que incentiva vários projetos e leis a avançarem no intuito de melhorarem o gerenciamento dos recursos hídricos (Pasqualetto et al., 2022).

A gestão dos recursos hídricos no Brasil vem sofrendo grandes mudanças que direcionam para um sistema mais participativo, que visam a descentralização, participação e integração. De maneira panorâmica, relacionada aos aspectos históricos, pode ser pontuado como grande marco legislativo da gestão de água no país, o Código das Águas em 1934 (Murtha; Castro; Heller, 2015). Em seguida foi instituída a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), em 8 de janeiro de 1997 (Lei nº 9.433/1997), e criado o Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SNGRH), ganhando destaque com um dos fundamentos básicos, a gestão descentralizada e participativa (Borsoi; Torres, 1997; Ribeiro; Hora, 2020). Já no ano de 2000 foi instituída a Agência Nacional de Águas (ANA) como autarquia, pela Lei n. 9.984/2000. Esta possui autonomia administrativa e financeira, o órgão está ligado diretamente ao MMA (Ministério do Meio Ambiente) com o objetivo de efetivar no seu escopo a Política Nacional dos Recursos Hídricos integrando o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Brasil, 2000).

Dessa forma, uma ferramenta que vem sendo amplamente utilizada nas tomadas de decisão na gestão dos recursos hídricos são os modelos de simulação matemática. Esses modelos tornaram-se um dos instrumentos mais comuns para avaliar o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas. Para isso, são usadas técnicas de mapeamento somadas a combinação de outros modelos (Easton *et al.*, 2008; Notter *et al.*, 2007; Stackelberg *et al.*, 2007), e informações que descrevem o comportamento da infiltração e propagação do escoamento, séries históricas de precipitação e evapotranspiração, o que gera como produto o comportamento de vazões a partir de um balanço hídrico, além da investigação dos impactos no regime hidrológico causados pelas modificações no ambiente (Viola *et al.*, 2009).

Sendo assim, a utilização de modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão aplicada ao gerenciamento dos recursos hídricos tem ganhado notório destaque, além de colaborar nas análises de como o consentimento influencia o controle de uso e conservação da água. Vários modelos foram desenvolvidos e aplicados em diferentes épocas: o Soil Moisture Accounting Procedure-SMAP (Lopes *et al.*, 1982); Instituto de Pesquisas Hidráulicas -IPH II (Tucci, 2005); Modelo De Grandes Bacias- MGB (Collischonn *et al.*, 2007). Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System -HEC-HMS (USACE-HEC, 2016); Campus Agreste Watershed Model -CAWM (Cirilo *et al.*, 2020).

Porém, um dos grandes desafios da hidrologia computacional é a busca de modelos chuva-vazão que representem de forma mais confiável os parâmetros hidrológicos envolvidos, com o uso de banco de dados mais conciso. Nesse contexto, o Sistema de Informações Geográficas (SIG) tem sido uma ferramenta de apoio para o processamento de dados de entrada

e sua integração com os modelos hidrológicos, aumentando a confiabilidade dos estudos (Machado, 2003; Melo; Rufino, 2009).

Segundo Schellekens *et al.* (2016), embora tenha ocorrido um grande avanço no uso da modelagem hidrológica nos últimos anos, vários estudos mostram a divergência entre os resultados de simulação, o que se deve a dificuldade na disponibilidade de dados. Dessa forma, é destacada uma limitação a ser considerada no aparato de informações predecessoras para simulações hidrológicas, que é a carência de parâmetros de uma bacia hidrográfica, ou seja, dados escassos e inacessíveis em determinada área hidrológica. Sendo assim, busca-se fazer uso de uma metodologia conhecida como regionalização, onde os modeladores podem transferir parâmetros de uma área em que os dados são abundantes e bem monitorados para uma área semelhante onde os dados são escassos (Sivapalan, 2003; Kavetski; Fenicia, 2011). Isso é feito com base na suposição de que as características hidrológicas entre as duas áreas são semelhantes o suficiente para que os parâmetros possam ser transferidos com precisão. Dessa forma, a regionalização de parâmetros de modelos hidrológicos é um dos métodos mais comumente utilizados para a predição hidrológica de bacias hidrográficas não aferidas (Qi *et al.*, 2022).

A regionalização afere conexões operacionais através do agrupamento de métodos. Um deles utiliza medidas de proximidade espacial e similaridade física, e o outro, utiliza um parâmetro de modelo regressivo contra atributos da bacia (Oudin *et al.*, 2008; Zhang; Chiew, 2009; Arsenault; Brissette, 2014). O primeiro, procura identificar bacias que são semelhantes em termos de características físicas, climáticas, geográficas, ou outras características relevantes, onde se identificadas similaridades os dados podem ser transferidos para outra bacia. Já o segundo, consiste em modelos estatísticos que relacionam os parâmetros hidrológicos, de interesse, com atributos físicos, climáticos ou geográficos das bacias analisadas, assim, os modelos são usados para estimar parâmetros em áreas em que os dados são escassos com base em atributos conhecidos (Virões; Cirilo, 2019; Bastola, 2022). No tocante a temática, um estudo realizado por Qi *et al.* (2020), busca avaliar abordagens de regionalização para 2.277 bacias hidrográficas em todo o mundo observando que parâmetros hidrológicos baseados na proximidade espacial geralmente superaram os parâmetros baseados na similaridade física. Para isso, dois fatores de extrema importância são a quantidade e a qualidade dos dados disponíveis, que influenciam diretamente a confiabilidade das estimativas realizadas durante o processo de transferência de parâmetros, ou seja, à medida que mais dados são coletados e novos métodos de análise são desenvolvidos, a precisão da regionalização tende a ser elevada (Wang *et al.*, 2023).

Sendo assim, o presente estudo propõe-se a realizar a simulação hidrológica computacional por meio da transferência de dados de uma grande bacia para suas sub bacias aninhadas usando um modelo chuva-vazão concentrado, o *Campus Agreste Watershed Model* (CAWM), para uma das maiores bacias e mais significativa em termos de biodiversidade, do planeta, a Bacia Amazônica (IBGE, 2023). Além disso, considerou-se a relevância do gerenciamento dos recursos hídricos, e a importância deste estudo na disponibilidade de dados confiáveis para uma região hidrográfica de grande potencial hídrico e representação mundial.

2 HIPÓTESES

Os modelos hidrológicos servem como ferramentas para interpretar eventos dentro do sistema físico de uma bacia hidrográfica. Mesmo em áreas com dados limitados, é possível utilizar esses modelos para extrair parâmetros de regiões bem monitoradas e com dados abundantes, permitindo a previsão dos efeitos em diferentes cenários futuros. Diante disso, o presente trabalho pretende responder as seguintes hipóteses: (i) O modelo CAWM sendo um modelo chuva-vazão concentrado espacialmente é eficiente na modelagem para aplicação em grandes bacias; (ii) Através da modelagem com a calibração da bacia principal usando o CAWM é possível transferir os valores dos parâmetros para as sub-bacias aninhadas, no processo de regionalização.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho do modelo CAWM, quando aplicado a grandes regiões hidrográficas, no processo de transferência de dados por meio da regionalização de parâmetros.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Avaliar o desempenho do modelo CAWM na calibração da bacia Amazônica;
- b) Desenvolver e avaliar um procedimento para transferir valores de parâmetros entre sub-bacias aninhadas;
- c) Analisar o comportamento do modelo CAWM na transferência de dados e regionalização de parâmetros, entre diferentes bacias.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

Uma gestão eficiente da água minimiza a escassez e contribui com o aprimoramento de práticas sustentáveis (Jain *et al.*, 2019). Uma importante ferramenta que auxilia o gerenciamento dos recursos hídricos é a simulação hidrológica por meio do uso de sensoriamento remoto, sistemas de informação geográfica (SIG) e análise de dados em tempo real por meio dos modelos chuva-vazão. Estes instrumentos auxiliam a compreensão do ciclo hidrológico e na previsão de inundações, pois transformam dados de chuva em dados de escoamento permitindo aos pesquisadores e gestores preverem o volume de água que resultará de eventos de precipitação, permitindo aprimorar a gestão da água, melhorar o monitoramento, a eficiência da distribuição e se prepararem para casos de eventos extremos (Lavabre *et al.*, 1999; Iacovides, 2011).

De acordo com Iacovides (2011) as medidas legislativas desempenham um papel fundamental na gestão da água ao estabelecer a base legal para os direitos, o uso e as práticas de conservação. Aliadas a essas medidas deve-se desenvolver políticas abrangentes e inclusivas, que abordem questões como escassez hídrica, distribuição da água e impactos oriundos das mudanças climáticas. Além disso, a participação pública é essencial para a transparência das tomadas de decisão, a designação de responsabilidade e a garantia de que diversas perspectivas sejam consideradas.

Em países com grande extensão geográfica, como o Brasil, a disponibilidade de água varia significativamente entre as diferentes regiões e estações, sendo a água abundante em algumas áreas e escassa em outras. E ainda, a variabilidade climática e os eventos extremos, como secas e inundações, aumentam a complexidade da gestão hídrica, sendo essencial compreender a variação temporal dos componentes do ciclo hidrológico e sua influência no uso e disponibilidade da água (Cronin *et al.*, 2014; Prashanth; Ganguly, 2021). Uma gestão eficaz dos recursos hídricos é essencial para garantir a qualidade da água e a sustentabilidade a longo prazo. Os desafios relacionados a disponibilidade e uso da água são significativos, especialmente no que tange às mudanças climáticas e atividades antrópicas. Desse modo, estratégias integradas e adaptáveis a panoramas distintos são necessárias para enfrentar os desafios da gestão hídrica e garantir a disponibilidade de água a longo prazo (Parparov; Gal; Markel, 2013).

Uma gestão eficiente dos recursos hídricos deve integrar políticas, estratégias e medidas legislativas. Esta gestão integrada dos recursos hídricos deve envolver esforços coordenados entre vários setores e partes interessadas para garantir o uso sustentável e a conservação da

água. Além disso, este gerenciamento requer uma estrutura administrativa robusta que abranja níveis nacionais, regionais e locais. Isso inclui agências governamentais, autoridades de gestão hídrica e organizações comunitárias trabalhando juntas para implementar políticas de regulamentação do uso da água, a fim de garantir que os recursos hídricos sejam geridos de forma sustentável garantindo sua disponibilidade para as gerações atuais e futuras (Iacovides, 2011).

4.2 USO DE MODELOS HIDROLÓGICOS

Cada dia se mais faz necessário o uso de ferramentas que possam auxiliar no gerenciamento dos recursos hídricos de forma eficaz. Uma das alternativas é o uso de modelos matemáticos para melhorar a análise dos processos do ciclo hidrológico como um todo. Os modelos hidrológicos são ferramentas essenciais para simular o ciclo da água na Terra, avaliando a transformação da precipitação em escoamento. Inicialmente, os estudos focavam em processos individuais como precipitação, evapotranspiração e escoamento, mas, essa segregação pode gerar uma representação imprecisa dos fenômenos climáticos. Deste modo, é necessária uma integração dos modelos atmosféricos e hidrológicos, considerando suas distintas resoluções espaciais. Os modelos hidrológicos variam em objetivo (simulação ou otimização), gênese (empírica, conceitual ou física), discretização espacial (concentrada ou distribuída) e tempo (eventos isolados ou contínuos), refletindo a diversidade e aplicabilidade, da modelagem hidrológica, na gestão dos recursos hídricos (Almeida; Serra, 2017).

Como mencionado, os modelos hidrológicos e ambientais são frequentemente empregados na previsão e gerenciamento dos recursos hídricos, na avaliação de impactos ambientais e apoio de decisões políticas. À medida que esses modelos se tornam mais complexos, incorporando múltiplos processos físicos e biológicos, evidencia-se a necessidade de uma avaliação sobre quanto sua complexidade e aumento da acurácia. A incerteza é inerente a esses modelos devido à variabilidade natural dos sistemas, à limitação dos dados disponíveis e às simplificações feitas durante a modelagem (Wagener; Kollat, 2007).

A calibração, a análise de incertezas e o uso de múltiplos critérios em modelos hidrológicos aumenta a precisão, a confiabilidade das simulações e a capacidade do modelo de capturar diferentes aspectos do comportamento hidrológico, que são essenciais para a gestão dos recursos hídricos e ações de planejamento ambiental, como o estudo dos impactos e previsões de eventos extremos (Wu *et al.*, 2021).

Dessa forma, compreender as variações temporais e sazonais das componentes do ciclo hidrológico é crucial para o desenvolvimento de estratégias para uma gestão hídrica sustentável,

de modo a mitigar os impactos da variabilidade climática e garantir a disponibilidade de água para diversas atividades antrópicas. Além disso, os modelos hidrológicos proporcionam um entendimento aprofundado da dinâmica temporal sendo estes instrumentos valiosos para a gestão dos recursos hídricos (Prashanth; Ganguly, 2021).

Porém, os modelos hidrológicos são suscetíveis a erros sistemáticos e a distorções nas simulações. A calibração considerando dados passados ajuda os modelos a corrigirem falhas e melhorar a representação real dos eventos em estudo. Um processamento adequado de dados resulta em melhorias significativas na modelagem e na confiabilidade das previsões hidrológicas. Desse modo, é essencial que o modelo matemático utilizado seja adequado para o conjunto de dados analisado e esteja de acordo com o contexto da previsão, de modo que os resultados desenvolvidos possam oferecer ferramentas eficientes para a tomada de decisão na gestão hídrica (Boucher *et al.*, 2015).

A avaliação detalhada de modelos matemáticos e a consideração da incerteza na modelagem de sistemas hidrológicos e ambientais são essenciais devido à sua importância crescente nas tomadas de decisão da gestão de recursos hídricos. No entanto, a crescente complexidade dos modelos utilizados para representar sistemas reais apresenta desafios significativos, tornando cada vez mais difícil compreender o comportamento dos modelos, suas sensibilidades aos parâmetros de entrada e as incertezas associadas (Wagener; Kollat, 2007). Por sua vez, a modelagem matemática fornece diversos resultados significativos para melhorar os modelos climáticos que dependem de representações precisas de fenômenos ambientais que influenciam o clima terrestre. Os fenômenos naturais são complexos e requerem que sua modelagem incorpore análises temporais e espaciais de modo que previsões da realidade sejam simuladas com precisão (Antonietti *et al.*, 2007).

Por vezes, é requisitada a implementação de práticas de modelagem simplificada para gerenciar bacias hidrográficas complexas, o que leva a necessidade de equilibrar a simplicidade e a precisão nos modelos hidrológicos para enfrentar os desafios oriundos de áreas de estudos de grande extensão e alta variabilidade de dados. Além disso, modelos matemáticos simplificados, integrados a uma reprodução adequada dos processos hidrológicos, facilitam a aplicação prática, a confiabilidade e a interpretação dos resultados por gestores de recursos hídricos, melhorando as tomadas de decisões (Ahmed; Elshorbagy; Pietroniro, 2020).

A modelagem de sistemas hidrológicos dinâmicos e complexos permite uma representação detalhada e dinâmica de vários processos, como fluxo de água, armazenamento hídrico e interações entre componentes do ciclo hidrológico (Bancheri; Serafin; Rigon, 2019). No entanto, o estudo em grandes bacias hidrográficas apresenta distinções significativas em

relação àquela observada em pequenas bacias. A diversidade do relevo, variações nos usos do solo, tipos de solo distintos, diversidade vegetal e a variação na importância relativa de cada subsistema do ciclo hidrológico, como a representação da rede de drenagem e/ou do sistema de reservatórios subterrâneos, especialmente nas bacias da região amazônica, demandam abordagens específicas e adaptadas (Silva; Ewen, 2000).

No que se refere à modelagem de grandes regiões hidrográficas, uma ferramenta de destaque é o modelo MGB – IPH, desenvolvido e aprimorado ao longo dos anos no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul). Por sua vez, em grandes bacias onde os processos de propagação fluvial, com alto tempo de concentração, os efeitos de translação e atenuação das cheias são cruciais. Elas também se caracterizam pela integração entre divisores de água superficial e subterrânea, além da heterogeneidade na distribuição de chuva e tipos de solo. Sendo assim, a caracterização do terreno nessas áreas frequentemente requer o uso de técnicas avançadas como SIG e sensoriamento remoto (Collischonn; Tucci, 2001; Collischonn *et al.*, 2007).

No estudo de Paiva *et al.* (2013), foi utilizado o modelo hidrodinâmico MGB (IPH) na bacia hidrográfica do Rio Solimões, que integra variáveis climáticas, características do solo, uso da terra e a dinâmica dos rios. A validação dos resultados de vazão foi realizada com 18 medidores, confirmando a precisão do modelo na simulação dos níveis de vazão observados. A precisão foi superior em rios grandes, enquanto a maioria dos erros ocorreu em rios pequenos, possivelmente devido à incerteza na geometria desses corpos d'água. Além disso, a validação da extensão de inundação revelou um desempenho mais eficiente durante períodos de vazões altas, com alguns erros identificados em períodos de vazões baixas.

Wongchuig *et al.* (2019), realizou a reanálise hidrológica ao longo do século XX (HRXX) na Bacia Amazônica, desenvolvida com um modelo hidrológico-hidrodinâmico (MGB) e uma reanálise climática de longa duração (ERA-20CM), utilizando a técnica de assimilação de dados (LEnKF). Foram empregadas 114 observações diárias de descarga para validação e assimilação, com testes para otimizar a remoção de viés e o raio de influência. Os resultados indicaram que a correção de viés e a assimilação de dados melhoraram significativamente as simulações, reduzindo superestimações e corrigindo os tempos de recessão.

Ainda no contexto da aplicação de modelos em grandes bacias, Paiva *et al.* (2013), destacam um estudo que utiliza uma estrutura de assimilação de dados para previsão de vazão em rios da bacia do Rio Amazonas. Nesse estudo, foi empregado um modelo hidrológico-hidrodinâmico de larga escala, o MGB-IPH, acoplado a altimetria de radar calibrada. A

metodologia do Ensemble Kalman Filter (EnKF) foi implementada para integrar dados de centenas de estações de medição e informações do satélite ENVISAT. Os resultados indicaram uma significativa redução no erro quadrático médio da vazão *in situ* ($\Delta_{rms} = -49\%$) e uma eficaz transferência de informações para trechos não calibrados ($\Delta_{rms} = -16\%$). Os testes de sensibilidade ressaltaram a importância dos erros de precipitação e sua correlação espacial. As previsões de vazão, fundamentadas nas condições iniciais do esquema de assimilação, apresentaram boa concordância com as observações, mantendo uma habilidade significativa em grandes rios, mesmo em horizontes de previsão superiores há 90 dias. Esses achados evidenciam o potencial das previsões hidrológicas em regiões mal monitoradas, ao integrar modelos e dados de sensoriamento remoto.

Recentemente, metodologias como a reanálise climática têm possibilitado a construção de registros históricos dos sistemas climáticos. Nesse contexto, um artigo propõe a metodologia chamada Retrospectiva Hidrológica (HR), que simula grandes conjuntos de dados de precipitação como entrada em modelos hidrológicos, permitindo o desenvolvimento de um histórico hidrológico que facilita a análise de eventos de enchentes e secas. A pesquisa se concentra na bacia amazônica o estudo utiliza oito grandes conjuntos de dados de precipitação, com mais de 30 anos de registro, como entrada para um modelo hidrológico e hidrodinâmico de grande escala, o MGB-IPH. A análise estatística de séries temporais revelou uma tendência de aumento na intensidade de enchentes e secas sazonais em toda a bacia. Os resultados indicam que a HR representa adequadamente a maioria dos eventos extremos passados, alinhando-se com dados observacionais. A pesquisa sugere que, para representar a hidrologia regional e eventos extremos, é indicado utilizar grandes conjuntos de dados de precipitação, incluindo reanálises climáticas e produtos mesclados (Wongchuig *et al.*, 2017).

As mudanças climáticas impactam o regime hidrológico da bacia amazônica, afetando processos biogeoquímicos, transporte, vulnerabilidade a inundações, pesca e a geração de energia hidroelétrica. Sorribas *et al.* (2016), realizaram um estudo examina as projeções de mudanças climáticas na extensão de descarga e inundação na bacia amazônica, utilizando o modelo hidrológico regional MGB-IPH. As projeções para o período de 2070 a 2099 foram obtidas a partir de cinco Modelos de Circulação Geral (GCMs) do Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (CMIP5). Observou-se que o aumento da vazão média e máxima dos grandes rios que drenam os Andes no noroeste contribui para um incremento na vazão e extensão de inundação nas planícies de inundação peruanas e no Rio Solimões, com aumentos anuais médios e máximos variando entre +9% e +18,3%. Em contrapartida, projeta-se uma

redução da vazão dos rios, especialmente durante a estação seca, e uma diminuição da extensão de inundação nas regiões de águas baixas na Amazônia central (-15,9%) e inferior (-4,4%).

Um estudo extensivo realizado por Fleischmann *et al.* (2016), examinou os papéis das planícies de inundação na formação de hidrogramas, focando na Bacia do Rio Amazonas. Rios como o Purus, Madeira e Juruá foram identificados, apresentando grande atenuação em suas planícies de inundação e significativa assimetria negativa em seus hidrogramas. A análise de dados de vazão e nível de diversos medidores, juntamente com um mapa de pântanos obtido por sensoriamento remoto, corroborou os resultados teóricos. Observou-se que hidrogramas de rios amazônicos com amplas planícies de inundação, como os do curso principal do Amazonas e do Rio Purus, exibem alta assimetria negativa. A pesquisa revelou também uma correlação significativa entre a extensão das áreas inundáveis e a assimetria negativa em rios regulados por planícies de inundação, indicando o forte controle que essas áreas exercem sobre a forma dos hidrogramas. Em contraste, bacias sem pântanos significativos ou dominadas por pântanos interfluviais não mostraram essa correlação.

4.3 MODELOS CHUVA-VAZÃO

Dados de vazão são variáveis essenciais em muitos estudos hidrológicos e projetos hidráulicos. A rede de postos de medição de vazão no Brasil não é tão extensa e densa quanto a rede de postos de medição de precipitação. Dessa forma, para suprir essa necessidade, é essencial o desenvolvimento de modelos matemáticos que utilizem dados de precipitação, evapotranspiração e características físicas das bacias (como área, parâmetros de solo, tempo de concentração, entre outros) para estimar a vazão. Esses modelos são frequentemente denominados modelos chuva-vazão (Collischonn; Dornelles, 2013). Alguns outros exemplos de modelos caracterizados como modelos chuva-vazão são o SMAP (Lopes *et al.*, 1982), SHE (Abbott *et al.*, 1986), HEC-HMS (Feldman, 2000), GR4J (Perrin *et al.*, 2003), MGB-IPH (Collischonn *et al.*, 2007) e HBV (Bergström; Lindström, 2015).

Como mencionado, os modelos hidrológicos surgiram como uma importante ferramenta de apoio ao gerenciamento de recursos hídricos devido a sua capacidade de facilitar o entendimento dos processos físicos que ocorrem dentro de uma bacia hidrográfica, sendo assim, são importantes para os estudos que buscam equilibrar as demandas humanas, econômicas e ambientais (Nakagawa, 2020). Dessa forma, busca-se fazer uso de modelos hidrológicos para melhor compreensão e estudo do escoamento superficial que é fundamental para assimilar como o relevo e a intervenção humana, especialmente o uso e ocupação do solo, influenciam na formação e o impacto das redes de drenagem na dinâmica hidrológica (Mathias *et al.*, 2022),

além de fazer uso dos resultados obtidos da ferramenta hidrológica para possibilitar a proposição de medidas adequadas na melhoria da gestão dos recursos hídricos (Guyasa *et al.*, 2024).

A escolha e aplicação dos modelos hidrológicos adequado para determinada situação está relacionada com a importância de considerar as características específicas das bacias estudadas. Bouadila *et al.* (2023), compararam os modelos hidrológicos GR4J e ATHYS na bacia hidrográfica de Agüenza, sudoeste de Marrocos, para simular eventos de inundação e avaliar a gestão de recursos hídricos. O ATHYS demonstrou superioridade sobre o GR4J na simulação, enfatizando a importância de considerar os processos hidrológicos completos para prever com precisão fenômenos pluviométricos, de fluxo e inundações. Os indicadores de desempenho NSE, RSR e PBIAS confirmaram a eficácia dos modelos, especialmente destacando a eficiência do ATHYS em regiões semiáridas durante eventos de inundação.

Além disso, em relação aos estudos de comparação de modelos hidrológico, Sezen e Partal (2022) realizaram simulações de eventos de precipitação e escoamento na bacia de Antalya, Turquia, utilizando modelos conceituais como GR4J e GR6J, além de modelos baseados em redes neurais artificiais como WGANN e WSVR. A eficácia das simulações foi avaliada por meio dos indicadores NSE, índice de concordância (d) e RMSE. Os resultados indicaram que os modelos baseados em dados neurais superaram os modelos conceituais na previsão de fluxos extremos, sugerindo que a integração dessas abordagens pode aumentar a eficiência e precisão na representação de fenômenos hidrológicos. Na modelagem hidrológica de bacias semiáridas se destacam os modelos conceituais, que possibilitam avaliar a topografia, a cobertura do solo e a inclinação do curso de água, e como esses fatores influenciam o escoamento superficial. Sendo estas as variáveis hidrológicas que são mais impactadas na ocorrência de eventos de precipitação, o que requer uma modelagem hidrológica eficiente que considere a relação chuva-escoamento, pois esta é determinante na avaliação de fenômenos de inundações (Sun *et al.*, 2021).

O modelo chuva-vazão HEC-HMS demonstra eficiência na avaliação da ocorrência de inundações. Este possui como indicadores de desempenho decisivos: valores do erro médio, CN e NSE. E ainda, o modelo é eficiente na estimativa de volumes escoados durante cheias, com isso, podem ser previstas ocorrências de inundações, auxiliando as tomadas de decisão da gestão hídrica (Laassilia *et al.*, 2022). Haddad (2022) também usou o HEC-HMS, para a previsão de cheias, na bacia hidrográfica de Oued El Hachem, localizada na região árida do norte da Argélia. A calibração e validação do modelo foram realizadas usando como dados de entrada o tempo de retardo e o Curve Number (CN), e, para avaliar a eficiência do modelo

foram considerados o coeficiente de determinação, o coeficiente de Nash-Sutcliffe e as diferenças percentuais entre pico e volume. O modelo demonstrou eficiência na análise comparativa entre os dados calculados e observados, retornando resultados satisfatórios.

Yuhuan, Zhijia e Zhiyu (2020) afirmam que a variação da topografia em regiões semiúmidas e semiáridas influenciam significativamente o escoamento superficial durante eventos pluviométricos. Para explorar essa influência, os autores desenvolveram um modelo chuva-vazão de combinação espacial (SCMs) que integra os modelos Xin'anjiang (XAJ), Xin'anjiang-Green-Ampt (XAJG) e Green-Ampt (GA). Este modelo foi aplicado utilizando o método do CN para simulações em duas bacias hidrográficas na China: Dongwan, que é uma região semiúmida, e Zhidan, situada em uma área semiárida. Os resultados mostraram que os parâmetros hidrológicos utilizados no modelo representam de forma mais precisa a bacia Dongwan, enquanto a bacia Zhidan foi mais influenciada pelos mecanismos de escoamento. Isso sugere que o modelo proposto é eficaz para simulações que levam em conta dados de solo e topografia, especialmente em áreas com características hidrológicas complexas.

Além disso, a análise interpretativa desses resultados revela a importância de considerar a variação topográfica ao modelar escoamentos em regiões semiúmidas e semiáridas. O SCMs se mostrou uma ferramenta robusta para captar as nuances desses ambientes, destacando a necessidade de integrar diferentes modelos hidrológicos para melhorar a precisão das simulações. A aplicabilidade diferenciada do modelo nas duas bacias sugere que ajustes específicos as características locais são essenciais para uma representação precisa do comportamento hidrológico, o que é crucial para o planejamento e a gestão eficiente dos recursos hídricos nessas regiões (Yuhuan; Zhijia; Zhiyu, 2020).

Xu *et al.* (2020) avaliaram a eficiência do modelo TOPMODEL utilizando três métricas de desempenho: o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), o coeficiente de determinação (R^2) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE). Essas métricas proporcionam uma visão abrangente da precisão e da confiabilidade do modelo em simular os processos hidrológicos. O coeficiente de Nash-Sutcliffe mede a habilidade do modelo em prever os valores observados em comparação com as suas médias, onde valores mais próximos de 1 indicam um bom desempenho do modelo. O coeficiente de determinação, ou R^2 , avalia a proporção da variância nos dados observados que é explicada pelo modelo, também com valores mais próximos de 1 indicando uma melhor capacidade de previsão. A raiz do erro quadrático médio, por sua vez, fornece uma medida da magnitude dos erros entre os valores previstos e observados, com valores menores indicando maior precisão.

Outro modelo chuva-vazão, desenvolvido por pesquisadores brasileiros que retorna boa eficiência na modelagem de eventos pluviométricos é o CAWM (Campus Agreste Watershed Model). Cirilo *et al.* (2020) demonstram a eficiência deste modelo conceitual quando aplicado em bacias hidrológicas distintas, secas e úmidas. O modelo demonstra caráter inovador no que diz respeito à quantidade reduzida de parâmetros que se faz necessário calibrar e a inserção de dados físicos da bacia simulada, de modo que em bacias similares, na ausência de dados de fluxo, possa ser realizado o processo de regionalização. Deste modo, a eficiência do modelo foi avaliada, através dos critérios de desempenho, na simulação hidrológica de quatro bacias hidrográficas localizadas no estado de Pernambuco, região Nordeste do Brasil. Conclui-se no estudo que as simulações se mostraram satisfatórias de 55 a 92% dos eventos avaliados.

4.4 GEOPROCESSAMENTO NA MODELAGEM HIDROLÓGICA

A definição dos parâmetros de entrada de modelos hidrológicos é cercada de muita dubiedade, o que acontece em razão de três principais causas: intercorrência natural das particularidades das bacias; estruturação dos modelos, que podem não evidenciar de forma fidedigna os processos implicados no escoamento; parâmetros de entrada, que podem ser inconstantes em decorrência de inúmeras razões, dentre elas está o uso de dados incertos (como vazão e precipitação) ou em decorrência da metodologia de estimativas destes, onde é possível mencionar o número de deflúvio do método SCS (*Método Soil Conservation Service*), podendo ocorrer variação relacionado ao usuário e sua acepção da bacia hidrográfica (Martins, 2012).

A combinação de instrumentos técnicos e ferramentas mais modernas à utilização de modelos hidrológicos têm se tornado cada vez mais constante, ocasionando em um conhecimento mais aperfeiçoado das características das bacias, e consequentemente ampliando a exatidão dos resultados encontrados. Nessa circunstância, o SIG (Sistema de Informação Geográfica) manifestou-se como uma ferramenta poderosa no que diz respeito à obtenção de dados relacionados às bacias hidrográficas e aos estudos hidrológicos.

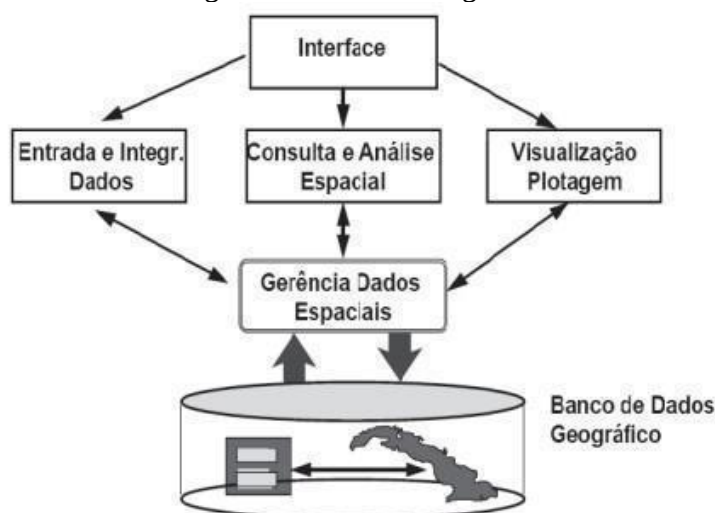
A qualidade dos dados envolvidos em um processo de simulação impacta diretamente na confiabilidade do resultado e isso é uma das grandes dificuldades encontrada nos modelos hidrológicos. Nesse quesito que entram ferramentas como o Sistema de Informação Geográfica (SIG) e o Sensoriamento Remoto para capturar os dados físicos que farão parte da estrutura de entrada de alguns modelos (Tucci, 2005).

A procura pelo conhecimento dos fenômenos naturais e seu vínculo com a área geográfica de ocorrência necessita de uma simbolização da superfície da terra. Os sistemas de informações geográficas (SIG), ajudam atualmente no suporte dessa demanda, os quais têm

sido usados como instrumento de suporte e apoio nas mais variadas áreas de estudo (agricultura, recursos hídricos, recursos minerais, planejamento territorial, entre outras).

No que diz respeito a literatura relacionado a esse assunto, um SIG pode ser compreendido como um sistema respaldado em computador que permite registrar, modelar, armazenar, reintegrar, examinar, analisar e exibir dados georreferenciados, ajudando na representação e conhecimento dos fenômenos que acontecem na superfície terrestre. A estrutura de um SIG, de uma maneira generalizada, é constituída pelos parâmetros de interface com o usuário, as funcionalidades de processamento gráfico e de imagens, plotagem e visualização, e a armazenagem e recuperação de dados estruturados conforme a forma de banco de dados geográficos (Cysne, 2004). Na Figura 1 é possível verificar a ilustração dessa estrutura.

Figura 1 - Estrutura integral do SIG



Fonte: Adaptado de Casanova *et al.* (2005).

Embora aparente ser apenas um sistema, um SIG é uma soma de tecnologias adaptadas que visa coletar, tratar, verificar e administrar informações georreferenciadas de inúmeras áreas do entendimento. Para que essa adaptação seja possível, os atributos e a geometria dos dados num SIG precisam estar georreferenciados e apresentados numa projeção cartográfica, além de armazenados e estruturados em um banco de dados.

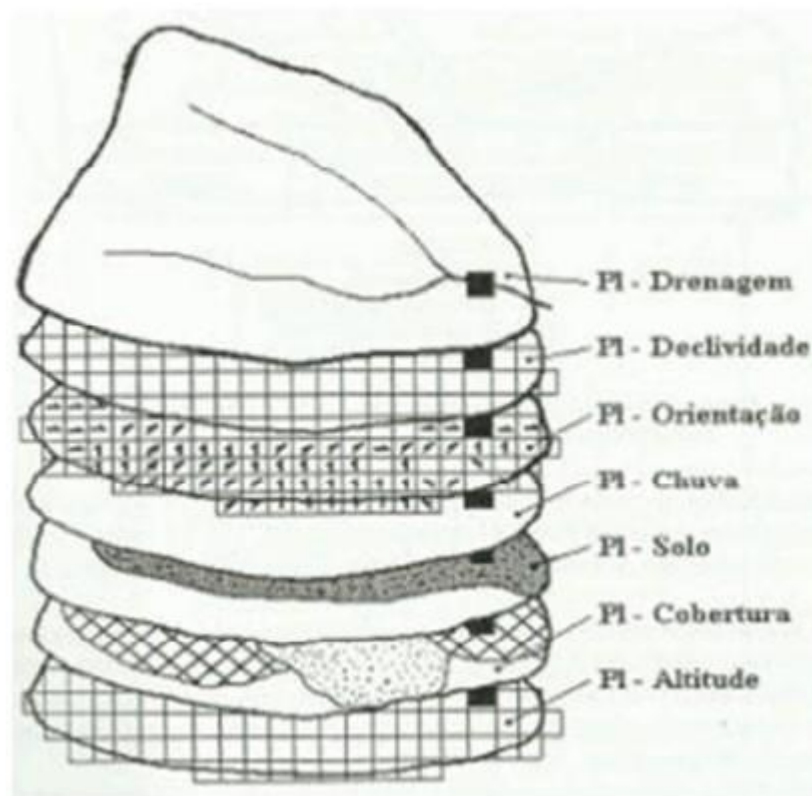
Na hidrologia, o uso de um SIG é determinado pela demanda de representações mais refinadas do terreno. Com a evolução da tecnologia de aquisição, processamento de dados e representação, também houve um aumento do uso de SIG na modelagem hidrológica. Com a utilização de um SIG é possível obter um detalhamento espacial aprofundado de características da região estudada, associados a modelos hidrológicos distribuídos, assim auxiliando para o

conhecimento mais minucioso dos processos complexos que, quando ponderados de uma maneira conjunta, convergem para uma maior exatidão na análise do fenômeno (Sui; Maggio, 1999).

A utilização de um SIG admite fracionar a bacia hidrográfica em subáreas homogêneas, que por meio dos resultados georreferenciados colaboram para a particularização quantitativa dos parâmetros hidrológicos. O uso de um SIG viabiliza a caracterização temporal e espacial das bacias hidrográficas. As informações fisiográficas de uma bacia são levantadas através de mapas, imagens de satélite e fotografias aéreas. Exemplos dessas informações: área, cobertura do solo e declividade, comprimento, que são medidos de modo direto ou expressos por índices.

Na Figura 2 são apresentados os planos de informação (PI) de um sistema de coordenadas geográficas, que representam uma bacia hidrográfica, frequentemente usados como parâmetros de entrada dos modelos hidrológicos.

Figura 2 - Especificidades da bacia hidrográfica em um SIG



Fonte: Tucci (2005).

Segundo a literatura de Tsou e Whittemore (2001), o SIG proporciona para a modelagem hidrológica uma plataforma constituída para gerenciamento, análise e

representação distinta dos dados, facilitando assim no compilado de dados, visualização dos parâmetros resultantes e calibração do modelo, assim auxiliando no desenvolvimento de informações para o propósito final. A inserção de modelos aos SIG é determinada em dois tipos: integração das equações do modelo ao SIG ou integração por meio de uma interface de transferência de dados entre o modelo e o SIG. A primeira maneira de integração é definida pela customização por meio do código fonte onde é realizada a integração das equações do modelo aos elementos do SIG. Na segunda maneira de integração, o SIG é usado nas fases que antecedem e sucedem ao processamento: os arquivos de entrada dos modelos hidrológicos produzidos no SIG são transformados para o formato que será usado no modelo hidrológico; os arquivos de saída do modelo hidrológico serão transferidos para planejamentos de informação do SIG, no qual os resultados são mostrados.

O SIG tem ferramentas capazes de auxiliar de diversas formas, como, por exemplo, no processamento de muito dados armazenados, na análise e calibração de modelos, nas previsões e estimativas e auxilia ativamente no pós-processamento dos resultados através da tabulação e mapeamento de dados. Pensando mais além, os sistemas de informações geográficas permitem a aquisição, ajustes e integração de dados, o que facilita a obtenção dos dados de entrada e saída dos modelos hidrológicos (Grossi, 2003; Mendes; Cirilo, 2013).

Essa interface entre os sistemas de informações auxiliando os modelos hidrológicos vem sendo um caminho cada vez mais importante justamente pelo fato de os SIG atenderem melhor as necessidades demandadas pelos modelos hidrológicos. O SIG facilita a compilação, calibração do modelo e visualização dos parâmetros e resultados do modelo, uma vez que tem uma plataforma integrada para gerenciar, analisar e mostrar diferentes dados. É justamente com essa união de valiosas informações que se torna possível a tomada de decisões de forma embasada (Tsou; Whittemore, 2001).

Apesar de qualquer tipo de modelo necessitar de parâmetros físicos, que são determinados por modelos digitais do terreno, para Mendes e Cirilo (2013), os modelos distribuídos contêm uma quantidade maior de dados no seu processamento muito superior do que modelos concentrados. Devido a isso, a obtenção de parâmetros e validação destes modelos são mais trabalhosos e aumentam de acordo com a área de modelagem.

É possível encontrar diversas bases de dados espaciais em resoluções diferentes que representam o terreno pelos Modelos Digitais do Terreno (MDT) e Modelos Digitais de Elevação (MDE). Podemos destacar os produtos do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), uma das bases de dados globais mais utilizadas que incorpora a técnica InStar (Interferometric Synthetic Aperture Radar). A técnica InStar disponibiliza globalmente

informações sobre variação de altitude da superfície terrestre através do United States Geological Survey (USGS). Estes dados possuem resolução espacial de 30 m e elipsoide de referência WGS84 (Alves Sobrinho *et al.*, 2010). Como durante muito tempo os pontos cotados eram a cada 90 m para locais fora dos Estados Unidos, o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) realizou uma interpolação dos dados gerando um produto com resolução de 30 metros (Valeriano, 2008).

4.5 DADOS DE ENTRADA DE MODELOS HIDROLÓGICOS

Os dados de entrada dos modelos hidrológicos estão divididos em dois grupos: dados históricos hidrometeorológicos e dados físicos das bacias hidrográficas. No primeiro grupo, relacionado aos dados históricos, é constituído pelos dados meteorológicos e hidrológicos. Esses são constituídos pelo histórico de vazões em postos fluviométricos, umidade relativa, dados de precipitação em postos pluviométricos e de dados de parâmetros climáticos como temperatura, insolação, velocidade do vento e pressão atmosférica. As principais fornecedoras e fontes de dados hidrometeorológicos e cartográficos das bacias são as Instituições governamentais. No segundo grupo se encontram a cobertura vegetal e uso do solo, os planos de informação dos tipos de solo, entre outros. Nesse grupo também se pode obter o modelo digital de elevação (MDE), que simboliza a morfologia do terreno, no qual é usado para calcular especificidades da bacia ou dos módulos determinados na discretização como: área, declividade, comprimento de rio e direção de fluxo. Para o MDE e os dados cartográficos considera-se, dentre outras: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Os dados de monitoramento hidrológico são concedidos pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados climatológicos são disponibilizados pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) (Cysne, 2004).

As informações hidrometeorológicas adquiridas através do sensoriamento remoto no Brasil são concedidas pelo INPE, precisamente pelo CPTEC. A competência na representação da bacia hidrográfica com a utilização de um modelo hidrológico está diretamente ligada à qualidade dos dados submetidos nos processos de simulação. Um dos grandes problemas voltados aos modelos hidrológicos, especialmente os distribuídos, é a quantidade grande de dados que são envolvidos, uma vez que as especificidades naturais das bacias hidrográficas resultam numa quantidade grande de dados que precisam ser transferidos para o modelo hidrológico. Por conseguinte, os sistemas de informações geográficas (SIG) têm sido usados

para a produção de dados que atuam como parâmetros de entrada para os modelos hidrológicos, permitindo através dessa associação, manipular dados espaciais e servir também como ferramenta de colaboração para a tomada de decisões pertinentes com o planejamento e a estruturação do território (Santos *et al.*, 2006).

4.6 MÉTRICAS DE DESEMPENHO

Buscando analisar as performances de modelos usados em diversos estudo, investiga-se o emprego de indicadores de eficiência. Para pôr em prática esse processo, são usados determinados índices de desempenho estatísticos, entre eles: Coeficiente de Nash-Stucliffe – NSE, NSEsqr, NSElog, percentual de tendência – Pbias, Razão entre o RMSE, o Desvio Padrão – RSR e Coeficiente de determinação - R².

O primeiro, o NSE é um índice comumente usados na hidrologia e na modelagem de recursos hídricos para avaliar o desempenho de um modelo na simulação de dados observados. O valor do parâmetro é uma medida que representa o ajustamento dos dados simulados em relação aos dados observados. Ele é calculado com base na diferença entre os valores observados e os valores simulados, levando em consideração a média dos valores observados. O índice varia de $-\infty$ a 1 e é frequentemente interpretado da seguinte forma:

- Um valor de NSE igual a 1 indica um ajustamento perfeito dos dados simulados aos observados, ou seja, o modelo é uma correspondência exata com os dados observados.
- Um valor de NSE igual a 0 indica que o modelo é tão bom quanto uma previsão média constante, ou seja, não há melhoria em relação a uma previsão simples da média dos dados observados.
- Um valor de NSE inferior a 0 indica que o modelo é pior do que uma previsão média constante, o que significa que ele não está sendo útil na simulação dos dados observados.

Para melhor compreensão do que foi citado acima, destaca-se abaixo as equações NSE com complementos as versões raiz e logarítmica do *Nash*.

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{calc})^2}{\sum (Q_{obs} - Q_{obs,med})^2} \quad (1)$$

$$NSE_{raiz} = 1 - \frac{\sum (\sqrt{Q}_{obs} - \sqrt{Q}_{cal})^2}{\sum (\sqrt{Q}_{obs} - \sqrt{Q}_{obs,med})^2} \quad (2)$$

$$NSElog = 1 - \frac{\sum (\log(Q_{obs}) - \log(Q_{calc}))^2}{\sum (\log(Q_{obs}) - \log(Q_{obs,med}))^2} \quad (3)$$

Por sua vez, O PBIAS, ou Percent Bias, é uma medida usada para comparar as vazões simuladas com as vazões observadas. Essa medida quantifica a tendência das vazões simuladas de serem maiores ou menores do que as vazões observadas e é expressa como uma porcentagem. Aqui está a fórmula para calcular o PBIAS, conforme mencionado na sua descrição:

$$PBIAS = \frac{(Q_{obs} - Q_{calc}) * 100}{\sum Q_{obs}} \quad (4)$$

Dessa forma, o resultado do cálculo do PBIAS será uma porcentagem. Valores próximos de zero ou com baixa magnitude indicam boas simulações, o que significa que as vazões simuladas estão próximas das vazões observadas. Porém, se o valor do PBIAS for positivo, isso indica que as vazões calculadas são superestimadas em relação às vazões observadas. Por outro lado, se o valor do PBIAS for negativo, isso indica que as vazões calculadas são subestimadas em relação às vazões observadas.

Por fim, o RSR é uma forma de normalizar o erro quadrático médio (RMSE) pela divisão pelo desvio padrão das vazões observadas, tornando-o adimensional e, portanto, mais adequado para comparações entre diferentes locais, escalas ou conjuntos de dados.

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum (Q_{obs} - Q_{calc})^2}}{\sqrt{\sum (Q_{obs} - Q_{obs,med})^2}} \quad (5)$$

Dessa forma o resultado do cálculo do RSR é adimensional e varia entre 0 e infinito. Quanto menor o valor do RSR, melhor é o ajuste das vazões simuladas em relação às vazões observadas.

Em suma, a média de valores classificados como suficientes para avaliação da performance dos modelos obedeceu a categorização proposta por Moriasi *et al.* (2015), apontadas na Quadro 1 abaixo.

Quadro 1 - Categorização dos coeficientes de eficiência

CLASSIFICAÇÃO	NSE	PBIAS (%)	R ²	RSR
Muito boa	$0,75 < \text{NSE} \leq 1,00$	$\text{PBIAS} < \pm 10$	$0,80 < \text{R}^2 \leq 1,00$	$0,00 < \text{RSR} \leq 0,50$
Boa	$0,65 < \text{NSE} \leq 0,75$	$\pm 10 < \text{PBIAS} \leq \pm 15$	$0,70 < \text{R}^2 \leq 0,80$	$0,50 < \text{RSR} \leq 0,60$
Satisfatória	$0,50 < \text{NSE} \leq 0,65$	$\pm 15 < \text{PBIAS} \leq \pm 25$	$0,60 < \text{R}^2 \leq 0,70$	$0,60 < \text{RSR} \leq 0,70$
Insatisfatória	$\text{NSE} \leq 0,50$	$\text{PBIAS} \geq \pm 25$	$\text{R}^2 \leq 0,60$	$\text{RSR} \geq 0,70$

Fonte: Adaptado de Moriasi *et al.* (2007).

A função-objetivo aplicada na calibração do modelo CAWM procura maximizar os valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe (ENS), e ao mesmo tempo minimizar as diferenças entre as vazões medidas e calculadas, por meio da equação 6:

$$F = \frac{\text{ENS} \cdot 10^6}{\sum \text{abs}(Q_{\text{abs}} - Q_{\text{calc}})} \quad (6)$$

4.7 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS

Almeida e Serra (2017) apontam que a metodologia de execução dos modelos pode ser subdividida por fases. Na primeira fase são apresentados todos os elementos necessários e são criados os bancos de dados para realizar a simulação. A segunda fase reproduz a simulação do modelo. Essa fase é fragmentada em duas etapas: calibração e validação. A calibração é o processo de designação dos valores dos parâmetros que aprovam a melhor simulação de um conjunto de dados observados. Sendo assim, o modelo é feito para exibir condições habituais de valores de parâmetros de entrada e saída constatados. A imprecisão com relação à adequação de um modelo pode ser determinada pelo ensaio de autenticação. Uma das fases que deve ser levada em consideração na aplicabilidade dos modelos hidrológicos é a calibração, que visa a definição dos valores dos parâmetros do modelo. Esta calibração dá-se através de dois procedimentos: automática ou tentativa e erro.

Mediante o método de tentativa e erro, o usuário faz o teste com conjuntos diferentes de parâmetros, dando continuidade nesta operação, até chegar em um vetor de parâmetros que, quando usado no modelo, consiga tanto quanto for possível retratar o feedback natural da bacia com relação a aquela precipitação. Este método está sujeito a experiência do usuário, onde usuários que contenham mais experiência de uma análise correta dos parâmetros podem confluir para valores racionais com a precisão desejada mais rapidamente. Já no método automático, a procura por um vetor apropriado de parâmetros, por intermédio de métodos

matemáticos de otimização, é realizada pela maximização (ou minimização) de uma função objetivo que mensura o desvio por entre as séries de vazão simulada e observada. A função objetivo é a concepção matemática dessa dessemelhança, e a calibração visa um vetor de parâmetros metafóricos, capacitado de encontrar o ponto ótimo da função. A cada passo realizado, o algoritmo calcula um valor novo da função objetivo, correlaciona com o último valor que foi calculado e percorre no caminho do valor ótimo para a função objetivo, quando só então se analisa a confluência e finaliza-se o processo iterativo. O processo só é finalizado ao ser localizado um ponto ótimo da função (Oliveira, 2015).

O autor supracitado aponta ainda que a validação é determinada como o processo de apresentação dos parâmetros ponderados na calibração. Na validação busca-se analisar se os valores dos parâmetros conseguem ser disponibilizados a outros grupos de dados, desse modo, demonstrando a adaptação da utilização do modelo e tornando autêntico o processo de simulação.

4.8 TRANSFERÊNCIA DE PARÂMETROS ENTRE BACIAS ANINHADAS

Os modelos hidrológicos são compostos por diversos parâmetros que têm impactos diretos ou indiretos no escoamento superficial e são essenciais para prever a magnitude da vazão do rio. Este aspecto crítico da modelagem hidrológica é utilizado para quantificar os efeitos de escoamentos resultantes de diferentes modelos de precipitação com outros processos físicos. Além disso, a modelagem em hidrologia tem se diversificado da tarefa primária de previsão de escoamento superficial para uma ampla gama de aplicações (Alemu *et al.*, 2023). As séries temporais de descargas contínua fornecem informações necessárias para uma infinidade de tarefas de engenharia hídrica, como desenvolvimento de produção de energia hídrica, gestão de bacias e hidrográficas, alocação de água, previsão de inundações e secas. Apesar disso, os dados de vazão não estão prontamente disponíveis em todos os trechos do rio. Uma bacia hidrográfica não aferida é uma área com registros de vazão inexistentes ou de baixa qualidade, sendo estendidas para bacias que sofrem mudanças significativas, uma vez que os dados históricos podem não refletir mais os processos hidrológicos que ocorrem dentro da bacia (Karki *et al.*, 2023).

Dessa forma, a calibração de um modelo hidrológico torna-se uma atribuição difícil principalmente onde não há a disponibilidade de dados. No entanto, com o avanço da tecnologia e a combinação de informações regionais, dados de satélites e técnicas avançadas de modelagem e otimização podem ajudar a superar os desafios (Anand *et al.*, 2024). O processo de transferência de parâmetros de uma bacia aferida para uma bacia não calibrada é referido

como regionalização de parâmetros de modelo (Fischer; Schumann, 2021; Kittel, 2020). A regionalização é um procedimento comum na modelagem hidrológica e em outras áreas de estudo ambiental. Quando os dados são escassos ou inacessíveis em uma determinada área, os modeladores podem transferir parâmetros de uma área onde os dados são abundantes e bem monitorados para uma área semelhante onde os dados são escassos. Isso é feito com base na suposição de que as características hidrológicas entre as duas áreas são semelhantes o suficiente para que os parâmetros possam ser transferidos com precisão.

No entanto, é importante notar que a regionalização deve ser feita com cautela e consideração cuidadosa das diferenças entre as áreas envolvidas. As condições hidrológicas podem variar significativamente de uma região para outra, e a aplicação de parâmetros de uma área para outra sem considerar essas diferenças pode levar a resultados imprecisos. Vários métodos de regionalização foram propostos e numerosos estudos compararam esses métodos em diferentes regiões durante as últimas décadas (Abdulla; Lettenmaier, 1997; Hundecha; Bárdossy, 2004; Oudin *et al.*, 2008; Pokhrel *et al.*, 2008; Jin *et al.*, 2009; Samaniego *et al.*, 2010; 2011; Razavi; Coulibaly, 2013; Li; Zhang, 2017; Yang *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2020). Grandes avanços foram alcançados no campo da regionalização em estudos anteriores, nos quais diferentes modelos hidrológicos foram acoplados a vários métodos de regionalização.

Dessa forma, para uma boa organização e eficiência do estudo a regionalização dos parâmetros pode ser realizada utilizando a relação funcional entre os parâmetros do modelo e os atributos da bacia ou usando uma medida de similaridade, a técnica usada vai depender do objeto do estudo, da região analisada e das informações disponíveis, cada qual com diferentes graus de dificuldades e distintos desempenhos alcançados (Acuna, Pizarro, 2023).

Portanto, com base na necessidade de estimar uma relação funcional, o método de regionalização apresenta dois tipos principais, sendo o primeiro uma abordagem de similaridade de local ou regionalização usando medidas de similaridade e o segundo, utilizando uma regressão dos parâmetros do modelo contra os atributos da bacia (Bastola, 2022). Ambos os grupos de métodos têm suas vantagens e limitações, e a escolha do método mais apropriado depende das características dos dados disponíveis, das características das bacias hidrográficas em questão, e dos objetivos específicos da regionalização. Em qualquer caso, é fundamental realizar uma cuidadosa validação dos resultados para garantir a precisão e a confiabilidade das estimativas obtidas. Porém, existem várias abordagens e métodos de regionalização de parâmetros hidrológicos que são comumente utilizados na prática, como exemplo:

- *Métodos baseados em características físicas da bacia:* Esses métodos utilizam características físicas das bacias hidrográficas, como área de drenagem, comprimento

do curso d'água, altitude, uso do solo, entre outros, para estimar os parâmetros hidrológicos. Exemplos incluem o Método de Similaridade Hidrológica (Hydrological Similarity Method) e o Método Baseado em Regressão Linear Múltipla.

- *Métodos baseados em regionalização estatística:* Estes métodos utilizam técnicas estatísticas para identificar padrões e relações entre os parâmetros hidrológicos e as características das bacias. Exemplos incluem a Análise de Componentes Principais (Principal Component Analysis), Análise de Regressão Espacial (Spatial Regression Analysis), e Métodos de Krigagem (Kriging Methods).
- *Métodos baseados em modelos de transferência de informação:* Esses métodos utilizam modelos matemáticos ou de aprendizado de máquina para transferir informações de bacias bem monitoradas para bacias menos monitoradas. Exemplos incluem Redes Neurais Artificiais (Artificial Neural Networks), Modelos de Regressão Não Linear, e Modelos Hidrológicos Distribuídos.
- *Métodos baseados em sistemas de informação geográfica (SIG):* Estes métodos utilizam técnicas de SIG para espacializar e analisar dados georreferenciados relacionados às características das bacias hidrográficas e aos parâmetros hidrológicos. Exemplos incluem Análise de Georreferenciamento (Georeferencing Analysis), Modelagem de Superfície Hidrológica (Hydrological Surface Modeling), e Interpolação Espacial.

Yadav, Wagener e Gupta (2006) conduziram um estudo com o objetivo de compreender a resposta de diferentes bacias hidrográficas a eventos hidrológicos, considerando variáveis como precipitação, escoamento e características físicas das bacias. A investigação focou na regionalização com base nas características físicas das bacias para analisar o comportamento dinâmico dessas regiões hidrográficas. Os resultados indicam que a incerteza na estimativa dos modelos hidrológicos pode ser reduzida através dessa abordagem metodológica. Além disso, o estudo destaca a importância de considerar as características físicas das bacias e sua resposta a eventos hidrológicos, sugerindo que uma regionalização mais precisa conduz a previsões hidrológicas mais confiáveis.

Entretanto, alguns modelos hidrológicos podem não operar da melhor forma no processo de regionalização em bacias sem dados hidrológicos baseados em características físico-climáticas. O modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) pode quantificar corretamente as elevadas taxas de fluxo durante o período úmido do estudo, apesar de representar corretamente o balanço hídrico e a sazonalidade dos principais componentes do ciclo hidrológico (Véliz; Casimiro, 2020). Em contrapartida, no que tange ao bom desempenho

do modelo supracitado, Beza, Hailu, e Teferi (2023) avaliaram o desempenho do SWAT na bacia hidrográfica de Jewuha, que possui uma área total de 680 km². Após a calibração e simulação com dados de vazão observada, o estudo revelou que o modelo demonstrou habilidade significativa na simulação da hidrologia da bacia. Os coeficientes de determinação (R^2), eficiência Nash-Sutcliffe (NSE) e percentual de viés (PBIAS) foram de 0,74, 0,73 e 0,80 para a fase de calibração, respectivamente, e de 0,71, 0,70 e 7,90 para a fase de validação.

Além do uso dos parâmetros baseados em características físicas da bacia, outras metodologias são empregadas no processo de regionalização de parâmetros. Um modelo proposto por Chaves *et al.* (2002), conhecido como regionalização explícita, que significa que não requer a divisão prévia da área de estudo em regiões homogêneas, logo, utiliza uma abordagem que considera a variabilidade espacial das características da bacia hidrográfica de forma integrada. Essa metodologia é alcançada através do uso de técnicas estatísticas ou modelos que capturam a heterogeneidade natural da bacia sem a necessidade de simplificações excessivas, o que pode ser útil onde a heterogeneidade das bacias é complexa e não facilmente definida por divisões prévias, permitindo uma modelagem mais precisa e adaptável às condições locais.

Um estudo realizado na sub-bacia do Lago Abaya-Chamo, na Bacia dos Lagos do Vale do Rift, Etiópia, empregou modelos de regressão linear múltipla para estimar características hidrológicas em áreas sem monitoramento adequado. Como resultados, os modelos regionais tiveram um bom desempenho por apresentarem erros relativos <10% nas regiões que apresentaram alto desempenho. No entanto, destacam a necessidade contínua de mais dados e pesquisa para melhorar a precisão das estimativas e apoiar decisões de gestão hídrica mais robustas (Abdi; Gebrekristos, 2022).

Porém, devido às várias fontes de incerteza em relação à estrutura do modelo, baixa identificabilidade de parâmetros, erros nos dados de calibração, atributos de captação e incerteza na relação de regressão, é desafiador identificar um método robusto de regionalização adequado que tenha melhor eficiência na modelagem (Guo *et al.*, 2021). Em um estudo de grande amostra, Qi *et al.* (2020) avaliaram várias abordagens de regionalização de parâmetros hidrológicos para um conjunto de 2.277 bacias hidrográficas em todo o mundo, com objetivo de comparar a eficiência dos diferentes tipos de regionalização. Dessa forma, o estudo apontou que a doação de parâmetros hidrológicos com base na proximidade espacial geralmente superou a doação com base na similaridade física, enquanto ambas superaram as técnicas de regressão, o que podemos destacar a importância de considerar a localização geográfica das bacias à realização a regionalização.

De maneira similar, no estudo realizado por Yang *et al.* (2020), foi avaliado o desempenho dos cinco métodos de regionalização mais utilizados, sendo eles: proximidade espacial com média de parâmetros, proximidade espacial com média de saída, similaridade física com média de parâmetros, similaridade física com média de saída e métodos de regressão. Utilizou-se quatro modelos diários de chuva-escoamento superficial (GR4J, WASMOD, HBV e XAJ) ao mesmo tempo. Os resultados mostraram que os métodos de proximidade espacial e similaridade física apresentaram melhor desempenho para todos os modelos hidrológicos, já o método de regressão mostrou desempenho inferior na maioria dos casos. Reiterando, um estudo conduzido em sub-bacias da bacia hidrográfica do Cheliff, utilizando o modelo hidrológico HEC-HMS e técnicas de regionalização baseadas em proximidade espacial e similaridade física, demonstra a eficácia dessas abordagens na estimativa de vazões em bacias não monitoradas. Esta conclusão é corroborada pela análise de desempenho, onde os valores do coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NSE) superaram 0,65 (Makhloufi *et al.*, 2023).

De forma semelhante, Soni *et al.* (2021) avaliaram o desempenho de cinco métodos de regionalização (média global; regressão; proximidade espacial; similaridade comportamental e rede neural artificial) usando dados de 24 bacias da região da península indiana. Constatou-se que o método de regressão demonstrou superioridade em comparação aos outros métodos de regionalização na previsão de vazões diárias e de pico. Apesar de apresentar um coeficiente de determinação (R^2) superior durante a calibração, o método de rede neural artificial mostrou um desempenho inferior, possivelmente devido ao número limitado de dados nessa etapa.

Alguns estudos ainda demonstram o grande potencial de combinar a regionalização tradicional de parâmetros e métodos de calibração de parâmetros baseados na evapotranspiração obtida por sensoriamento remoto em simulações hidrológicas em bacias hidrográficas não medidas. A primeira etapa envolve a calibração dos parâmetros do modelo usando dados de vazão observada, enquanto a segunda etapa utiliza dados de evapotranspiração para ajustar ainda mais os parâmetros do modelo em diferentes regiões. Foi observado como resultado uma calibração mais precisa dos parâmetros, o que resultou em estimativas mais confiáveis de escoamento e processos hidrológicos. Além disso, a metodologia aplicada mostrou-se promissora para pesquisas futuras na adaptação de parâmetros hidrológicos em várias condições ambientais e climáticas (Xu *et al.*, 2022).

Com base nos estudos que destacam as dificuldades dos modelos hidrológicos em representar adequadamente a vazão em diversas regiões devido à falta de dados precisos sobre precipitação e vazão, os desafios na estimativa da evaporação potencial, à influência da variabilidade temporal da vegetação, à complexidade na quantificação das perdas de água por

transbordamento e às limitações na estrutura matemática dos modelos existentes, torna-se evidente a importância da regionalização na simulação hidrológica. Essa abordagem não apenas melhora a precisão dos modelos, mas também facilita uma compreensão mais aprofundada e uma gestão mais eficaz dos recursos hídricos em diferentes condições ambientais e climáticas dentro de uma bacia hidrográfica. Dessa forma, diante das dificuldades enfrentadas na simulação de modelos hidrológicos, houve um aperfeiçoamento significativo nos modelos padrões no que diz respeito à regionalização dos parâmetros. Sendo assim, os modelos aprimorados incorporam técnicas avançadas de regionalização que permitem uma distribuição mais precisa dos parâmetros do modelo, levando em consideração a heterogeneidade natural das bacias.

4.9 MODELO CAWM

Devido à necessidade de compreender melhor o ciclo hidrológico e a dinâmica das cheias, com o objetivo de aprimorar a capacidade de prever a resposta da bacia frente a alterações atuais e futuras, e assim auxiliar os órgãos governamentais e a comunidade na gestão dos recursos hídricos, torna-se imprescindível o uso de modelos hidrológicos robustos. É igualmente crucial que as variáveis de entrada utilizadas na modelagem sejam baseadas em dados precisos e concretos para garantir maior eficácia no processo de simulação operacional. No entanto, a simulação de grandes bacias, especialmente aquelas que incluem áreas úmidas e semiáridas, continua sendo um desafio significativo para a comunidade hidrológica (Fleischmann *et al.*, 2018).

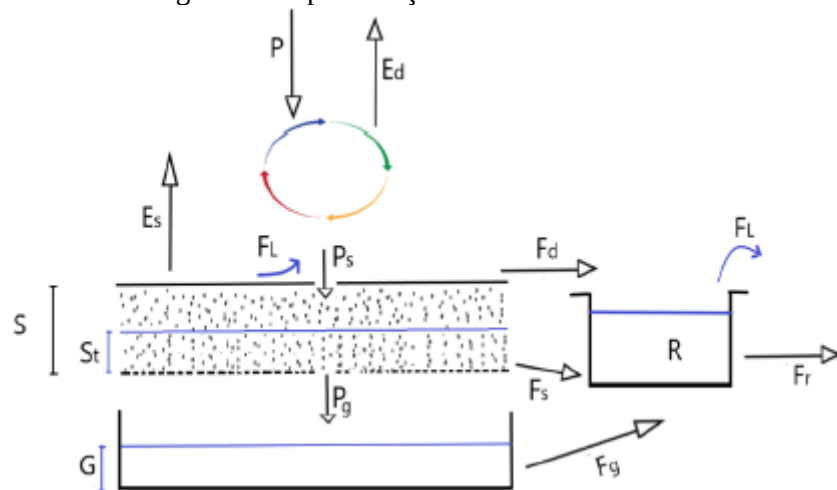
Dessa forma, para atender a essa necessidade, têm sido desenvolvidos modelos hidrológicos específicos que variam em complexidade, resolução espacial, representação de processos e outras características pertinentes, geralmente com muitos parâmetros a calibrar (Cirilo *et al.*, 2020). Segundo o autor supracitado, modelos mais parcimoniosos no tocante à quantidade de parâmetros também podem representar o comportamento das bacias hidrográficas. Para isso, foi apresentado o modelo conceitual CAWM (Campus Agreste Watershed Model), desenvolvido na Universidade Federal de Pernambuco, incluindo duas versões: a versão IV que teve como principal finalidade realizar a simulação do escoamento superficial em bacias hidrográficas de regiões semiáridas e a versão V para regiões úmidas (Cirilo *et al.*, 2020; Ferraz, 2019). De forma geral, o modelo CAWM tem como principal característica a simplicidade pois para sua calibração são necessários poucos parâmetros de entrada.

O modelo CAWM é considerado um modelo conceitual concentrado de chuva-vazão, pertencentes ao grupo de modelos de contabilidade de umidade do solo. Conforme mencionado anteriormente, o modelo hidrológico em questão foi projetado inicialmente para simular escoamentos em solos rasos e com baixa capacidade de armazenamento, características típicas de regiões com embasamento cristalino, valendo-se das capacidades avançadas de entrada e saída de dados e utilizando informações provenientes de técnicas de geoprocessamento sobre bases espaciais como o SRTM – Shuttle Radar Topography Mission e o Programa Pernambuco Tridimensional, PE3D (Cirilo *et al.*, 2022). A versão V do CAWM, por sua vez, foi desenvolvida para simular deflúvios em áreas úmidas e de maiores extensões. Diferente dos modelos conceituais mais clássicos, onde a estimativa de parâmetros é feita exclusivamente por métodos estatístico ou empírico, que no seu escopo o CAWM incorpora um conjunto de características físicas da bacia em sua formulação para possibilitar a regionalização dos parâmetros.

Em síntese, o CAWM dispõe de dois conjuntos de informações que aplica como dados de entrada: um condiz com as características físicas da bacia hidrográfica e o outro corresponde às características hidrológicas. As características físicas são levantadas a partir de mapeamento do solo, satélite e imagens aéreas, Modelo Digital de Terreno (MDT). As informações hidrológicas representam séries de chuva, séries de vazões usadas para calibração e evapotranspiração.

Para representar os processos do ciclo hidrológico em regiões úmidas foram feitas adaptações no modelo para representar bacias de rios perenes. Na versão anterior, o modelo possuía dois reservatórios, um de recepção (R) e outro subterrâneo (S), posicionado nas calhas dos rios. Dessa forma, mudança principal do CAWM V com relação à versão anterior é a implantação de um reservatório subterrâneo de acumulação (G) que só poderá ser alimentado quando o reservatório do solo alcançar a saturação. Esta representação pode ser observada no esquema da Figura 3.

Figura 3 - Representação do Modelo CAWM V



Fonte: Ferraz (2019).

Ferraz (2019) diz que a evapotranspiração potencial é associada com a precipitação nesse modelo hidrológico. Se houver precipitação suficiente, toda a evapotranspiração será contabilizada e subtraída do cálculo. O excesso de chuva, após a evapotranspiração, é denominado precipitação efetiva (P_n). Quando não houver precipitação suficiente, toda precipitação é convertida em evapotranspiração (E_a) adicionada a parcela remanescente (E_m). Esta pode ser integral ou parcialmente tirada do reservatório subterrâneo (S), em conformidade com a quantidade de água existente no mesmo. As equações 7 e 8, simultaneamente, a seguir exibem o balanço entre a evapotranspiração e precipitação:

$$\text{Se } P \geq E, \text{ então } P_n = P - E \quad (7)$$

$$\text{Se } P \leq E, \text{ então } P = E_d \text{ e } E_n = E - E_d \quad (8)$$

A precipitação efetiva é fragmentada em três partes. A primeira é identificada como recarga do solo, calculada pela equação 9 subsequente:

$$P_s = \frac{S \cdot \left(1 - \left(\frac{St}{S}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{S}\right)}{1 + \frac{St}{S} \tanh\left(\frac{P_n}{S}\right)} \quad (9)$$

Onde (St) representa o acúmulo de água no solo ao longo do tempo (t), e (S) é a capacidade máxima de armazenamento, obtida através de mapeamentos de solos (capacidade máxima de acumulação), a equação apresentada passa por modificações conforme atualizações do modelo que serão discutidas a seguir. No entanto, é importante ressaltar esta equação inicial para um melhor entendimento.

O segundo elemento é a definição da evapotranspiração complementar (E_s), que é removida das camadas do solo e restrita pelo valor da evapotranspiração não atendida (E_n). Sua relevância resulta do valor conferido ao parâmetro α , de acordo com a equação 10 abaixo:

$$E_s = \left(1 - e^{-\frac{\alpha \cdot St}{s}}\right) \cdot E_n \quad (10)$$

Dessa forma, (α) é estabelecido para identificar o grau de atendimento da evapotranspiração complementar (E_s). Este parâmetro foi aplicado para reparar os dados que dispõem de pouca precisão nessa variável, quando houver necessidade, podendo modificar de 0 a um valor superior (70, por exemplo), correspondendo a nenhuma ou a máxima evapotranspiração complementar. A modificação deste parâmetro é realizada por análise do balanço hídrico de um período extenso (um dos resultados do modelo), equiparando as lâminas de precipitação, evapotranspiração e vazão, analisando se a evapotranspiração está sub ou superdimensionada.

O terceiro elemento retrata o escoamento superficial direto para a calha do rio (F_d) e é estimado por meio da equação 11 abaixo:

$$F_d = P_n - P_s - E_s \quad (11)$$

Outra variável a ser destacada é o fluxo (F_s) que percola do reservatório da lâmina de água no solo (St) segue em direção ao reservatório da calha dos rios (R), conforme descrito pela equação subsequente 12:

$$F_s = K_s \times St \quad (12)$$

Seguindo, (K_s) é o parâmetro que vai ser calibrado e simboliza a permeabilidade do solo, e (F_s) retrata a percolação por meio do reservatório (R).

O modelo incorpora sequencialmente os fluxos (F_d) e (F_s) à lâmina de água armazenada no reservatório (R). Este reservatório não é apenas utilizado para estudar os extravasamentos durante enchentes. A partir dele, é gerado o escoamento fluvial (F_r) conforme a equação 13 a seguir:

$$F_r = K \times R^b \quad (13)$$

A relação não linear apresentado acima é utilizada no CAWM para representar o escoamento na calha fluvial, diferente da concepção usual de reservatório linear. A dedução desenvolvida sinaliza para expressão que pode permitir o cálculo do parâmetro K e considerar

$b = 5/3$, embora sejam muitas as simplificações realizadas no desenvolvimento matemático. O valor $b = 5/3$ tem se ajustado bem à simulação para dezenas de bacias hidrográficas (Feitoza, 2021).

Na versão CAWM IV, o parâmetro (K) era avaliado com base nos atributos físicos da bacia hidrográfica, os quais são extraídos através de técnicas de geoprocessamento utilizando o Modelo Digital de Terreno (MDT) da área estudada. O coeficiente de escoamento superficial (K) depende de estimativas e de variáveis cujos valores são obtidos do MDT, estando assim condicionados à resolução espacial do modelo do terreno. Para mitigar essa dependência, foram calculados valores de K para aproximadamente 250 bacias hidrográficas com áreas variando de 100 a 800 mil km^2 . Foram então ajustadas equações que relacionam K com a área, resultando nas seguintes relações:

$$K = 0,3745 \cdot A^{-0,489} + 0,0146 \quad \text{se } A \leq 1500 \text{ km}^2 \quad (14)$$

$$K = 8,93523 \cdot A^{-0,73033} \quad \text{se } 1500 \leq A \leq 6000 \text{ km}^2 \quad (15)$$

$$K = 0,0028 \quad \text{se } A \geq 6000 \text{ km}^2 \quad (16)$$

As perdas de água no sistema podem ser consequência de inúmeros fatores, como por exemplo: volumes retidos nas depressões do solo e pela vegetação, que aos poucos serão evaporados; infiltração nas fendas do embasamento cristalino; e volumes de extravasamento que não voltam à calha fluvial, que também será evaporado. Essa perda é retirada do reservatório da calha fluvial, (R). As perdas de água que ocorrem são calculadas por meio da equação 17 a seguir:

$$F_L = K_L \times R^p \quad (17)$$

O termo (F_L) representa as perdas de água que ocorrem nos sistemas e (K_L) é o coeficiente da perda de água, de grande sensibilidade no modelo. O expoente p ajusta na modelagem as perdas maiores quando a rede de rios sofre perdas maiores por extravasamento.

O parâmetro de perdas, K_L , originalmente era calibrado. Já na versão aqui utilizada, passou a ser calculado de modo intrínseco no modelo como um valor médio a partir do balanço hídrico durante a calibração (Equação 18), considerando os valores do balanço global gerado. Esse é um dos aprimoramentos introduzidos nesta versão do CAWM, já que, na versão anterior, K_L era um parâmetro a calibrar. A variabilidade das perdas pode ser ajustada a partir do parâmetro p , normalmente ajustado por tentativa e erro, já que sua variação é mais estreita,

entre 0,9 e 1,1 ($p=1$ distribui as perdas linearmente; $p>1$ aumenta as perdas para as vazões mais altas, típicas de transbordamento dos rios).

$$K_L = \frac{V_{Prec} - V_{Qobs} - V_{Evap}}{V_{Prec} - V_{Evap}} \quad (18)$$

Por fim, o fluxo (F_g), que representa o escoamento subterrâneo é apresentado pela equação 19 a seguir:

$$F_g = K_g \times G \quad (19)$$

Na versão do CAWM aqui utilizada adotou-se $K_g=K_s$, por não ter sido representativa essa diferenciação e assim reduzir-se um parâmetro a calibrar.

Para alimentar o abastecimento do reservatório subterrâneo, não existente na versão inicial do CAWM, o cálculo da percolação (P_s) teve a sua fórmula alterada para a equação 20 a seguir:

$$P_s = S \times \left(1 - \frac{St}{\beta \times S}\right) \quad (20)$$

Quando (St) alcança o valor de (S), o excesso passa a integrar a percolação profunda (S_g).

Desta forma, o modelo CAWM V passa a ter dois parâmetros a calibrar de forma automática: coeficiente de recarga β e os coeficientes de percolação $K_s(=K_g)$ (Oliveira, 2023). Logo, o CAWM na sua versão mais atual apresenta apenas dois parâmetros a calibrar e outros dois, e α e p , ajustados a partir dos totais de vazão e precipitação medida, bem como pela observação dos picos de vazão simulados.

Por sua vez, os parâmetros S e CN são essenciais para caracterizar a capacidade de armazenamento do solo e a resposta hidrológica de uma bacia. Eles permitem simular como as chuvas são interceptadas, infiltradas no solo e escoam através da bacia (Bedient *et al.*, 2012). Nesse modelo, o parâmetro (S) é calculado por meio da Curva Número médio (CN) da bacia hidrográfica, como apresentado pelo SCS, na equação 21 abaixo, para acúmulo de água no solo:

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (21)$$

É importante registrar que, diferente dos modelos usuais que utilizam CN ou S diretamente para o cálculo da vazão, no CAWM o valor de S é utilizado tão somente como a capacidade de acumulação de água no solo, para proceder o balanço hídrico nesse reservatório. Foram utilizados mapas de solo, imagens de satélite e imagens aéreas para determinar os parâmetros CN e S , com foco nos produtos desenvolvidos pela Embrapa. A classificação hidrológica dos solos pela Embrapa facilita a obtenção dos valores de CN , que são essenciais para calcular o parâmetro S . Santos *et al.* (2018) empregaram mapeamentos de solos da Embrapa e imagens de satélite classificadas para o uso e ocupação do solo nas bacias, visando calcular o CN .

Quando o tempo de concentração da bacia é maior que o passo de tempo de simulação, no caso padrão de um dia, é preciso considerar no CAWM o retardo entre a ocorrência da chuva e seu efeito no escoamento até o exutório. Para isso é preciso redistribuir previamente a chuva no tempo antes de realizar as simulações. Dois procedimentos distintos podem ser utilizados nos modelos (Oliveira, 2023):

- I. Calcular a distância de cada posto pluviométrico até o rio principal e daí até o exutório para estimar o “tempo de viagem T ” do volume precipitado naquele local até o exutório, usando como ponderação a fração desta distância/comprimento do rio (limite=1) e o tempo de concentração. O valor de T dias é usado para defasar os dados de precipitação do posto. Em seguida obtém-se a chuva média (calculada por polígonos de Thiessen ou outro método como o IDW: inverso da Distância);
- II. Calcula-se a chuva média e então se aplica a ela um histograma tempo-área com frações para cada dia definidas pelo método de Clark.

Análise adequada da distribuição espacial da precipitação pluviométrica desempenha um papel fundamental no planejamento dos recursos hídricos nas bacias hidrográficas, além de contribuir significativamente para estudos climatológicos e meteorológicos (Marcuzzo *et al.*, 2011). Devido à limitação na cobertura das estações pluviométricas em muitas áreas, torna-se necessário recorrer a métodos de interpolação espacial para preencher lacunas nos dados. Essa interpolação pode ser realizada por meio de técnicas estatísticas ou até mesmo por abordagens de aprendizado de máquina.

O método de interpolação conhecido como *Inverse Distance Weighted* (IDW) é amplamente utilizado para esse fim. Essa técnica consiste em calcular uma média ponderada espacial com base nos valores de pontos vizinhos ao local de interesse na interpolação. Isso permite considerar a variação gradual do valor estimado em relação à distância (Babak;

Deutsch, 2009). O método atribui pesos aos pontos vizinhos, sendo que quanto maior a distância de um ponto a ser interpolado, menor será seu peso e, conseqüentemente, menor será sua influência no valor estimado do ponto (Silva *et al.*, 2019).

Para calcular a precipitação média, realizou-se a interpolação dos dados de chuva até o centroide de cada sub-bacia em estudo, utilizando o método IDW. Uma macro desenvolvida no Excel foi empregada para efetuar esses cálculos. Os dados necessários para alimentar essa macro incluíram as coordenadas do centroide de cada sub-bacia e o caminho do diretório que continha os arquivos em formato CSV das estações pluviométricas baixadas por meio do *Hidroweb*.

O Método de Clark para calcular a defasagem da chuva média é o padrão adotado no modelo CAWM. As coordenadas do histograma tempo-área são determinadas com base nas Equações 22 a 24.

$$A_c = A \times t^n \quad \text{Para } 0 \leq t \leq 0,5t_c \quad (22)$$

$$A_c = 1 - a(1 - t)^n \quad \text{Para } 0,5t_c \leq t \leq 1 \quad (23)$$

$$a = \frac{0,5}{\left(\frac{t_c}{2}\right)^n} \quad (24)$$

Onde:

t – Tempo de percurso;

t_c – Tempo de concentração;

n – Coeficiente da forma da bacia.

Já para o coeficiente de forma da bacia, foi considerado o a redistribuição das precipitações ao longo do tempo, equação 25.

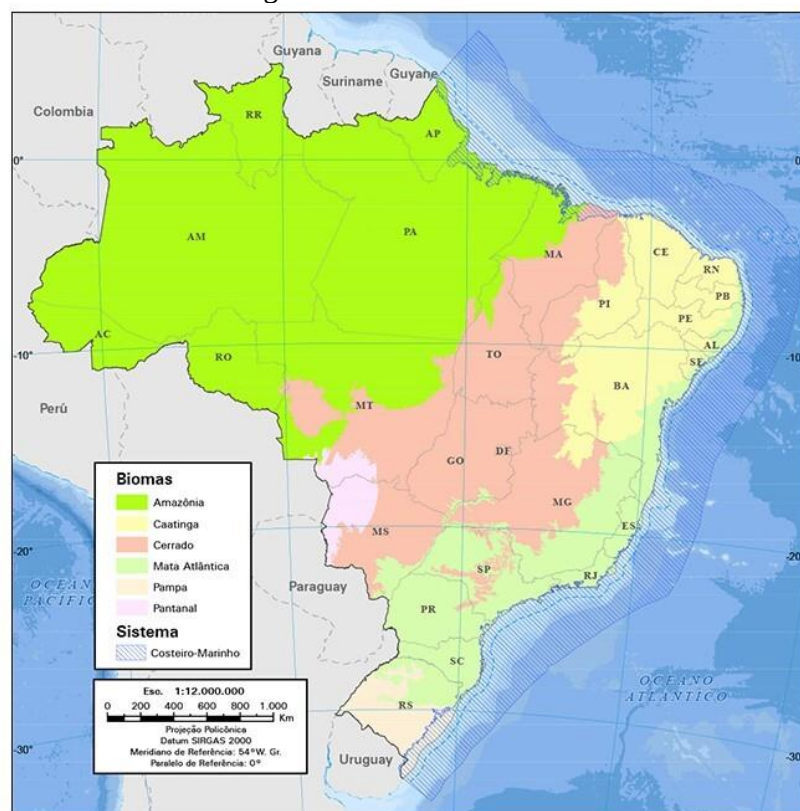
$$n = 0,282x\left(\frac{P}{\sqrt{A}}\right) \quad (25)$$

4.10 REGIÃO AMAZÔNICA

É sabido que a região amazônica é caracterizada por sua extensa biodiversidade, alta disponibilidade de recursos hídricos e grande importância ecológica para todo o mundo

(Gorayeb; Lombardo; Pereira, 2010). No que se refere aos biomas, como indicado na Figura 4, trata-se de uma vasta área geográfica caracterizada por condições climáticas e geológicas semelhantes, a região abriga uma diversidade específica de flora e fauna. Esse agrupamento de tipos de vegetação e vida animal é influenciado por processos históricos de formação da paisagem. A Floresta Amazônica é um exemplo significativo, sendo considerada a maior reserva biológica do mundo. Ela abriga cerca de metade de todas as espécies vivas do planeta, destacando-se pela sua enorme biodiversidade (IBGE, 2023).

Figura 4 - Biomas brasileiros



Fonte: IBGE (2023).

Contudo, as ações antrópicas na região amazônica afetam a paisagem natural e os ecossistemas adjacentes, em todo território são relatadas frequentes incidências de desmatamento e degradação da mata nativa, intensificando a perda de cobertura florestal. Além disso, em algumas áreas observa-se a transformação de áreas florestais em pastagens, campos agricultáveis, localidades edificadas e construção de estruturas hidrelétricas, que impactam negativamente a biodiversidade local, os recursos hídricos e os serviços ecossistêmicos. E ainda causa a fragmentação de habitats naturais e a interrupção de corredores ecológicos (Guerrero *et al.*, 2020).

A bacia amazônica abriga uma diversidade impressionante de espécies de água doce que são cruciais para a economia local e a subsistência das comunidades. Compreender as mudanças históricas e climáticas que afetam essas espécies é fundamental para sua conservação e manejo sustentável. É necessário que haja estratégias para o manejo sustentável das populações de peixes, considerando a variabilidade climática futura e o desenvolvimento de políticas de conservação que incorporem a dinâmica climática e demográfica para proteger as espécies economicamente importantes da região. Além disso, é importante integrar dados históricos e climáticos para entender e prever as respostas das espécies nativas às mudanças ambientais (Oliveira *et al.*, 2020).

As atividades humanas e as mudanças ambientais afetam a diversidade e a composição das comunidades ecossistêmicas amazônicas. A degradação dos habitats, a poluição e as mudanças climáticas alteram significativamente os ecossistemas, necessitando de esforços eficientes para protegerem essa biodiversidade tão significativa para todo o mundo (Toyama *et al.*, 2017). A região amazônica enfrenta desafios significativos, incluindo desmatamento, degradação ambiental, conflitos de terra e pressão por desenvolvimento econômico. Esses desafios tornam a implementação de práticas sustentáveis particularmente necessária, de modo que além dos ganhos financeiros, as empresas locais na região promovam a conservação da floresta e invistam em melhorias na qualidade de vida das comunidades locais (Fernandes; Sousa-Filho; Viana, 2021).

Dessa forma, na região amazônica há falta de tratamento adequado e distribuição desigual da água disponibilizada para o abastecimento humano. A qualidade inadequada da água tem impactos diretos na saúde das populações locais, como a incidência de doenças de veiculação hídrica, associadas ao consumo de água contaminada. Para mitigar esta problemática é necessária uma gestão integrada e eficiente dos recursos hídricos da região. O que inclui o fortalecimento das políticas públicas, a implementação de tecnologias de tratamento de água, aprimoramento das infraestruturas de saneamento básico e a promoção de práticas sustentáveis de uso e manejo do solo (Gorayeb; Lombardo; Pereira, 2010).

Diante do exposto é notório que o gerenciamento dos recursos hídricos na bacia amazônica é vital para a proteção ambiental, a conservação da biodiversidade, a regulação climática e o bem-estar das comunidades locais. Contudo, para realizar uma boa gestão dos recursos hídricos, é essencial ter acesso a uma variedade de dados, que forneçam uma compreensão abrangente dos recursos disponíveis, seu uso e as condições ambientais. Variáveis hidrometeorológicas, como precipitação, temperatura, umidade, fluxo dos rios e evapotranspiração, são fundamentais para compreender o ciclo hidrológico e os padrões

climáticos de uma bacia hidrográfica. Deste modo, estudos que avaliam as variáveis hidrológicas de uma região, como o monitoramento hidrometeorológico, a previsão de eventos extremos (como inundações e secas) e o planejamento de infraestrutura hídrica devem ser integrados nas políticas públicas e estratégias de manejo ambiental. Pois, a compreensão detalhada das variáveis climáticas de grandes regiões hidrográficas, como a Amazônica, na qual as mudanças naturais do clima e alterações no uso do solo afetam o comportamento hidrometeorológico, são fundamentais para ajudar a formular políticas eficazes para a conservação dos recursos hídricos e para desenvolver estratégias de mitigação dos fatores ambientais que impactam negativamente a região (Ribeiro *et al.*, 2022).

Xavier (2012) aponta que independentemente da grande importância da bacia amazônica, ela não dispõe de uma rede de monitoramento significativa. Mesmo que, nos últimos anos, a Agência Nacional de Águas tenha enviado esforços, que obtiveram como resultados a instalação de dezenas de novas estações pluviométricas e fluviométricas, ainda existe uma extensa carência de estações climatológicas. Para o alcance de séries de evapotranspiração, tem que se respaldar as pesquisas pontuais praticadas em campanhas de campo. Além do monitoramento insuficiente, a bacia amazônica ainda sofre com o desmatamento, especialmente, nas sub-bacias dos rios Tapajós e Madeira, incitado pela ocupação de forma acelerada da região desde a década de 70.

A bacia Amazônica possui uma grande escassez de dados pluviométricos, ocorrência comum em regiões amplamente florestadas e de difícil acesso (Ribeiro *et al.*, 2014). Além disso, oferece grandes desafios para a gestão dos recursos hídricos, pois além de deter uma considerável parcela de toda água doce do mundo, dispõe de uma baixa qualidade da água destinada ao abastecimento público (Gorayeb; Lombardo; Pereira, 2010). É uma das regiões mais biodiversa e ecologicamente importantes do mundo. Mas, atrelada a sua vasta disponibilidade de recursos, também há alta exploração destes, como a construção de hidrelétricas, que tem implicações significativas para o meio ambiente, comunidades locais e biodiversidade (Guerrero *et al.*, 2020).

A mudança da cobertura vegetal de áreas extensas ocasiona em alterações nos balanços hídrico e de energia da bacia, com consequências vagarosas para bacias vizinhas e para a própria bacia Amazônica, já que existe um transporte considerável de umidade da Amazônia para bacias do sul do Brasil (através do jato de baixa altitude) e para as demais regiões (em altas altitudes). A bacia amazônica tem sido objeto de diversas pesquisas de modelagem, desde a década de 70. Apesar de toda carência de dados para validar os resultados dos modelos, conclusões extremamente importantes foram publicadas, a título de exemplo, com relação aos

efeitos que o desmatamento traz a respeito de outras regiões da América do Sul e do restante do planeta (Xavier, 2012).

Guerrero *et al.* (2020) utilizaram técnicas de sensoriamento remoto e análise de imagens de satélite para mapear e quantificar as mudanças no uso e cobertura da terra na região Amazônica, a fim de avaliar os impactos da construção do Complexo Hidrelétrico Braço Norte. Utilizaram ferramentas de geoprocessamento para analisar dados em diferentes períodos, e puderam concluir que a região requer políticas mais robustas e melhores práticas de gestão sustentável para mitigar os impactos negativos das hidrelétricas na Amazônia, e, recomendam a implementação de zonas de proteção ambiental e programas de reflorestamento. E ainda, reforçam a importância de monitorar continuamente as mudanças no uso e cobertura da terra em regiões sensíveis como a Amazônia. Destacando a necessidade de equilibrar o desenvolvimento energético com a conservação ambiental, a fim de proteger a integridade ecológica da região.

A importância do sensoriamento remoto é fundamental em bacias hidrográficas extensas, como a bacia amazônica, que possui uma vasta rede de rios e áreas úmidas e apresenta uma significativa variação no armazenamento hídrico. Fersch *et al.* (2012) utilizaram dados de sensoriamento remoto para avaliar a dinâmica hídrica na bacia amazônica, o quantitativo de água atmosférica, global e dinâmica, por meio das observações derivadas do satélite GRACE, medindo as mudanças no armazenamento de água terrestre. O que lhes permitiu observar que os principais fatores intervenientes na distribuição de água na região são as variações sazonais e interanuais. A Bacia Amazônica apresenta distribuição irregular no armazenamento de água devido a sua extensa área territorial e as complexidades do ciclo hidrológico. As variações sazonais são marcadas pelas estações chuvosas e secas, enquanto as variações interanuais podem ser influenciadas por características climáticas, como os fenômenos El Niño e La Niña.

Em relação à forma, estrutura e processos geológicos e geomorfológicos, a bacia do Rio Amazonas pode ser subdividida em três amplas unidades morfológicas: a Cordilheira dos Andes, os Escudos das Guianas e Brasileiro, e a Planície Amazônica. Estas unidades correspondem, respectivamente, a 11%, 44% e 45% da área total da bacia. Os afluentes principais do rio Amazonas exibem especificidades hidrográficas referente às características de cada uma dessas unidades morfológicas. Tendo como exemplo, os rios com cabeceira na cordilheira dos Andes (Solimões e Madeira) denotam uma grande quantidade de partículas sólidas e matéria orgânica (Lopes *et al.*, 2017).

No que diz respeito à rede de rios, a bacia amazônica possui um amplo conjunto de rios navegáveis que são essenciais para o transporte de mercadorias e pessoas, crucial para a

economia regional e a integração de comunidades remotas, especialmente devido à limitada infraestrutura rodoviária da região (Lameira *et al.*, 2020). A bacia amazônica é a maior bacia hidrográfica do mundo e seu papel é fundamental na regulação do clima global e regional. No entanto, mudanças significativas no uso e na cobertura do solo alteram a paisagem natural e impactam processos hidrológicos e climáticos, afetando o balanço hídrico, o clima regional, os ecossistemas e a gestão dos recursos hídricos na bacia (Ribeiro *et al.*, 2023).

Assim, o rio Amazonas é o principal rio da bacia do Amazonas. De acordo com Lopes *et al.* (2017), sua nascente está localizada nos Andes peruanos e estende-se até o oceano Atlântico. A largura de seu leito pode atingir vários quilômetros, enquanto sua profundidade varia entre 40 e 100 metros. Manaus está situada a 1.500 km da foz, o nível da água varia entre 14 e 30 m acima do nível do mar, ocasionando em uma declividade média de 1 a 2 cm/km entre cheia e estiagem. A seção do rio localizada no Brasil é chamada de rio Solimões até o ponto de confluência com o rio Negro na cidade de Manaus, a partir de tal localização passa a ser denominado de rio Amazonas. A bacia fornece uma vazão média de aproximadamente 209.000 m³/s, podendo ocorrer uma variação por volta de 100.000 m³/s na estiagem até 300.000 m³/s em enchentes. O Rio Amazonas possui uma extensão de 6.992,06 km e precipitação média anual de 2.300,00 mm, sendo os maiores volumes identificados na foz do rio Amazonas, e seus principais afluentes são os rios Negro e Madeira (Marengo, 2004; Brito *et al.*, 2019).

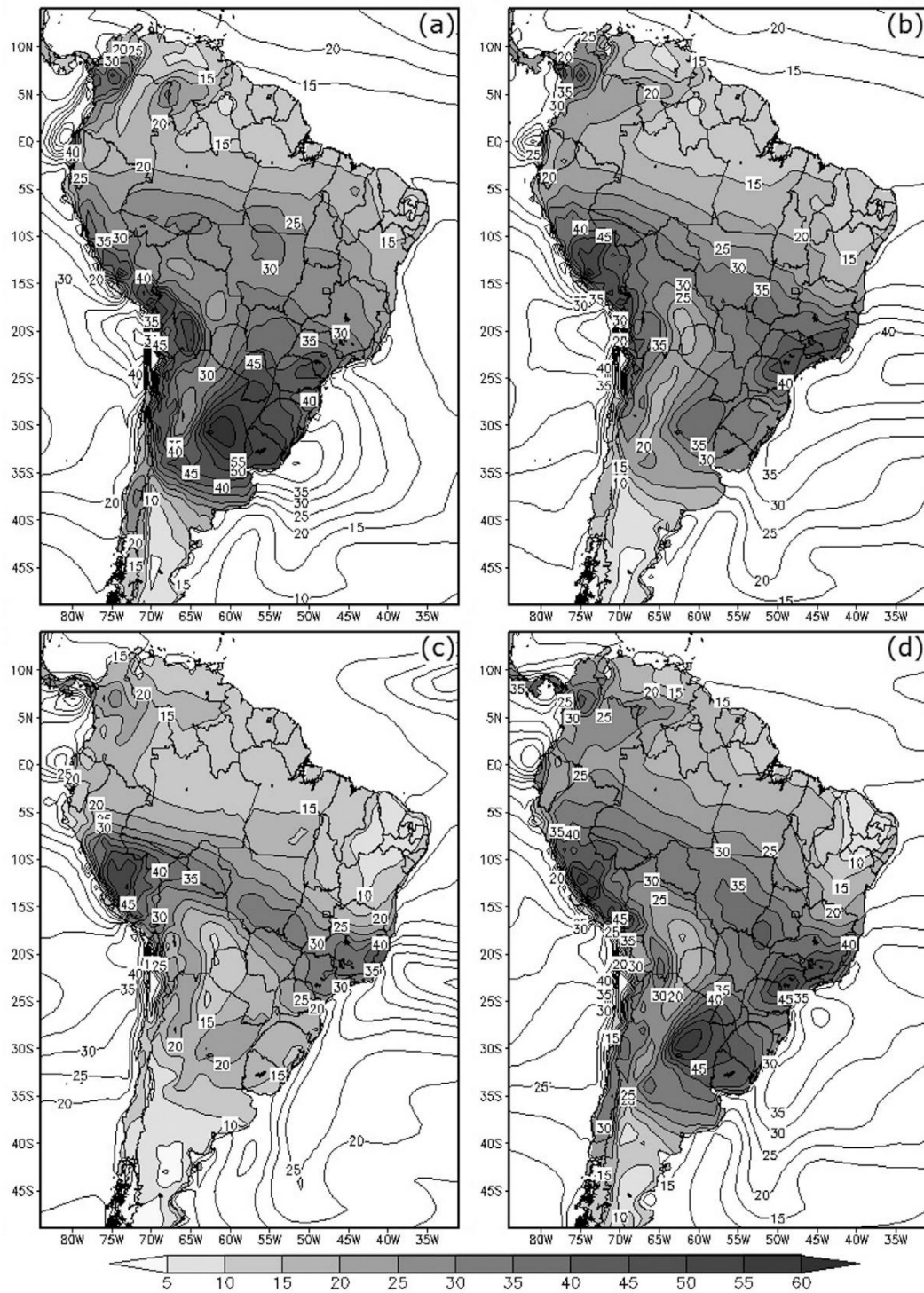
Ainda no que diz respeito à rede fluvial, o rio Madeira, com cerca de 3.380 km de extensão, é o maior afluente do rio Amazonas em termos de volume de água. Origina-se na Bolívia e atravessa o Brasil antes de desaguar no Amazonas. A temperatura média anual oscila entre 25 e 27 °C, enquanto a precipitação pode alcançar até 2200 mm por ano. O período com maior quantidade de chuvas ocorre de janeiro a março, e o mais seco vai de junho a agosto. As temperaturas mais baixas são registradas entre junho e julho, com mínimas absolutas variando de 10 °C a 16 °C (CPRM, 2001).

Por fim, dois rios adicionais merecem destaque na rede fluvial da bacia amazônica: o rio Tapajós e o rio Xingu. O Tapajós que nasce na região de Mato Grosso a partir da união dos rios Teles Pires e Juruena, percorre cerca de 2.700 km de extensão com vazão média de 13.500 m³/s e contribui com 6% da descarga de água doce lançada no rio Amazonas, sendo considerado o quinto maior afluente do rio Amazonas (Latrubesse *et al.*, 2005). Já o Rio Xingu, situada no estado de Mato Grosso, a nascente do rio Xingu está localizada na região conhecida como Alto Xingu, onde também se encontra o Parque Indígena do Xingu, já no estado do Pará, situam-se as regiões do Médio e do Baixo Xingu. Sua extensão total é de aproximadamente 1.980 km até se encontrar com o Rio Tapajós (Sanches *et al.*, 2020).

No contexto das precipitações, as chuvas ocorrem de novembro a abril na parte sul da bacia amazônica, enquanto ao norte da bacia, o período chuvoso vai de abril a setembro. Esse padrão ajuda a prevenir a formação de grandes cheias. As cheias no baixo Amazonas são notadas entre maio e junho, devido ao atraso das cheias nos afluentes. No entanto, em alguns anos, as chuvas nas bacias da margem direita podem se estender por mais tempo do que o habitual, ou as bacias da margem esquerda podem ter um início antecipado. Quando isso acontece, ocorre uma sobreposição de eventos, resultando em cheias intensas. Assim, a magnitude das cheias depende, em parte, da sincronização das contribuições das sub-bacias e, em parte, do volume absoluto das precipitações (Ribeiro Neto, 2001).

A Bacia Amazônica desempenha um papel crucial como fonte de umidade para outras regiões, contribuindo para o regime de precipitação em áreas adjacentes. Essa contribuição se deve à captação de vapor d'água proveniente tanto do oceano quanto da evapotranspiração da própria floresta, por meio do processo de reciclagem de precipitação. Em média, cerca de 20% da precipitação na bacia é resultado da evapotranspiração local, com valores variando de 15% na porção norte a 40% na porção sul. Assim, a contribuição local para a precipitação total é significativa no balanço hídrico regional, desempenhando um papel fundamental no ciclo hidrológico da Amazônia. Na figura 5, é possível analisar a média sazonal de reciclagem da precipitação sobre a América do Sul.

Figura 5 - Média sazonal da reciclagem de precipitação sobre a América do Sul no período de 1980 a 2005: (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera.



Fonte: Adaptado de Rocha *et al.* (2017).

A Figura 5 ilustra os campos médios sazonais de reciclagem de precipitação na América do Sul. Em termos gerais, a reciclagem de precipitação é mais manifestada na região centro-sul do continente, sendo influenciada pela evapotranspiração dessa área. Durante o período de verão, os valores de reciclagem de precipitação são mais elevados no setor sul da Bacia

Amazônica, relacionados a uma menor intensidade do fluxo de umidade e a valores elevados de evapotranspiração. Além disso, na Bacia Amazônica, a reciclagem de precipitação tende a aumentar de leste a oeste, refletindo a redução na intensidade do fluxo de vapor d'água nessa direção.

Segundo Goldman *et al.* (2009) na proporção norte da bacia amazônica, a disposição sazonal e espacial da chuva exibe uma heterogeneidade importante. Por outra perspectiva, a parte sul da bacia dispõe de estações chuvosas e secas distintas, com os valores máximos sendo verificados no período entre dezembro e março nas regiões noroeste da bacia e nas proximidades da foz. A chuva máxima anual constatada na região noroeste da Amazônia (por volta de 3000 mm) está relacionada com a convergência de umidade de baixa altitude, certamente em razão da presença dos Andes, sendo consequência do efeito da combinação da existência de uma zona quase definitiva de forte convecção e do papel da evapotranspiração vigorosa na reciclagem da chuva na região.

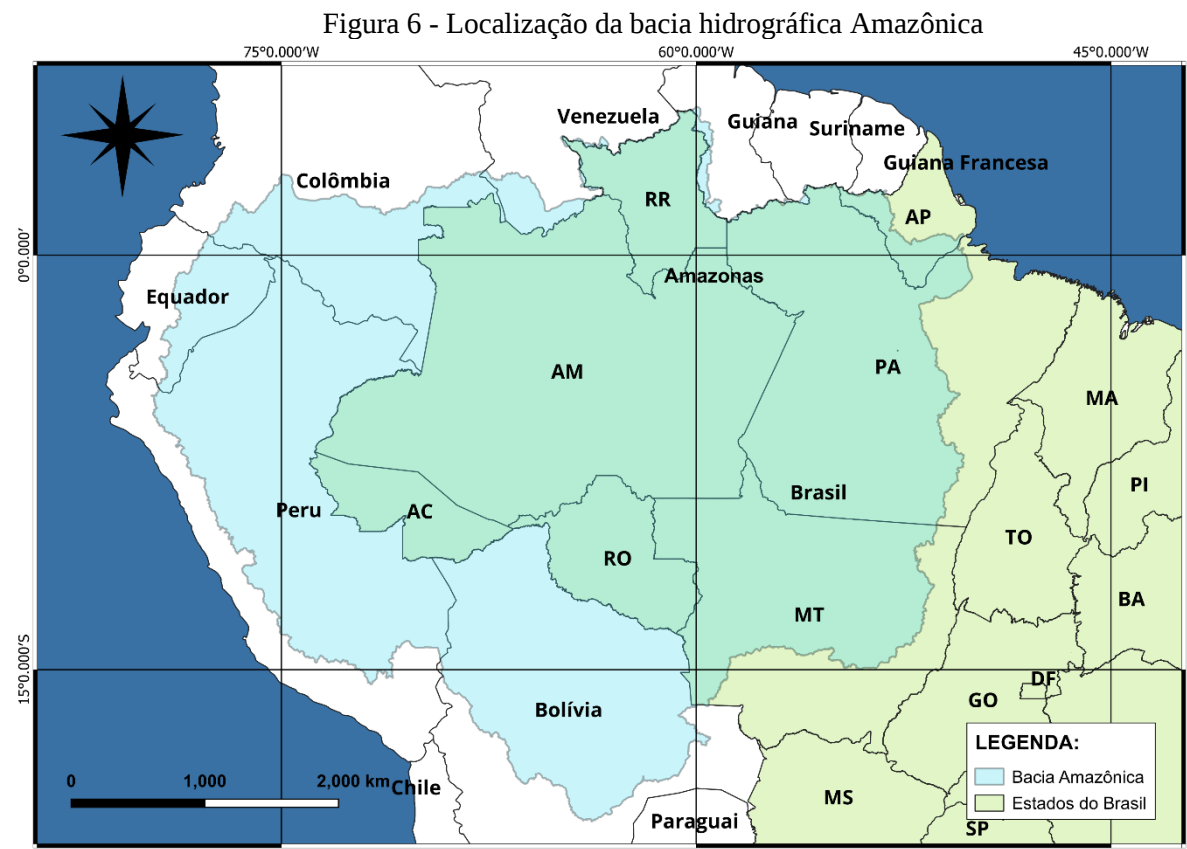
Durante o verão, a região de máximo é concentrada aproximadamente na latitude de 10S, expandindo-se no sentido sudeste do Brasil na forma da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Divergências no regime hidrológico são analisadas entre as regiões norte e sul da bacia amazônica, o que acontece por razão de um regime pluviométrico específico (Fassoni-Andrade *et al.*, 2021). Segundo Xavier (2012), a parte localizada ao sul da bacia amazônica (sub-bacias dos rios Tapajós e Madeira) está exposta a estações úmidas e secas bem estabelecidas, com a precipitação anual máxima vista no verão, dezembro e fevereiro. Em contrapartida, na parte localizada mais ao norte, a precipitação exibe dois máximos, na época entre março e maio, o primeiro relacionado a região noroeste da bacia amazônica (parte da sub-bacia do rio Negro), correlacionado com a convergência do fluxo de umidade (iniciado do oceano Atlântico) em razão da presença da Cordilheira dos Andes. Já o segundo máximo, encontra-se próximo da foz do rio Amazonas (sub-bacia do rio Branco), correlacionado com o trabalho da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Na parte localizada ao oriente da bacia (sub-bacia do rio Xingu), constata-se demarcada sazonalidade com valores máximos que acontecem entre janeiro e abril.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente tópico será abordada a área de estudo principal. Em seguida apresenta-se os parâmetros de geoprocessamento que foram necessários para dividir a bacia principal em sub-bacias. Após esse primeiro direcionamento e delimitação das subáreas, será detalhado o modelo chuva-vazão utilizado na pesquisa e todo memorial de cálculo dos parâmetros de entrada necessários para a calibração, simulação e regionalização dos resultados.

5.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende a grande Bacia Hidrográfica Amazônica, que possui uma extensão aproximada de 6,5 milhões de km². Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2023), 80% de toda água superficial do território brasileiro se encontra nesta região, que corresponde a aproximadamente 37% da América do Sul, Figura 6. Esta bacia é classificada como sedimentar terciária, com uma grande biodiversidade e uma vasta planície de inundação, com áreas alagáveis em cerca de 17% de sua extensão (Melack *et al.*, 2004; Barbosa, 2005).

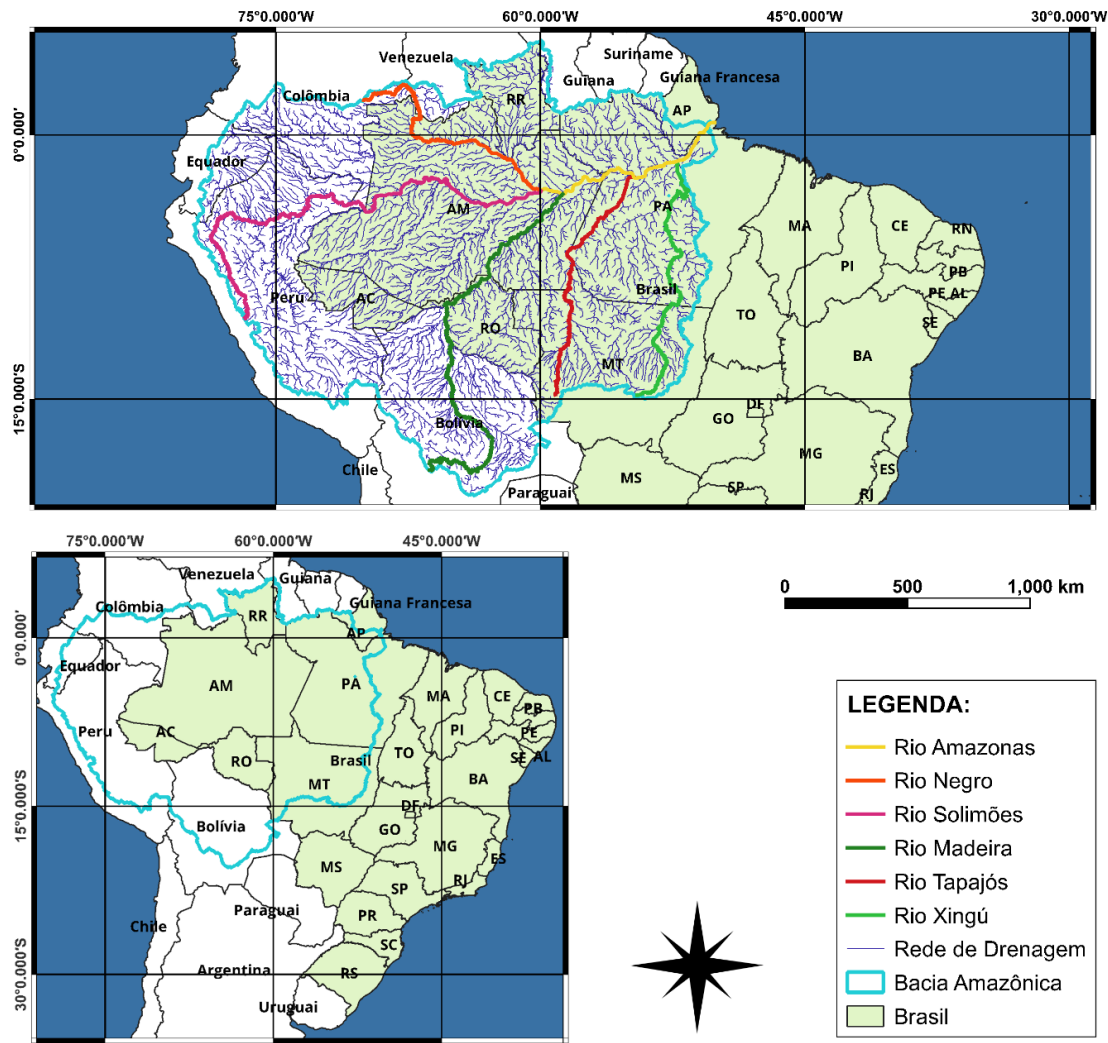


Fonte: O Autor (2024).

De acordo com a Figura 6, a Bacia Amazônica está situada em vários países da América do Sul. Esta abrange principalmente o Brasil, que possui a maior parte da bacia, cerca de 60% de sua extensão total. Além do Brasil, a bacia se estende pelo Peru, onde cobre a região ocidental, e pela Colômbia, abrangendo o sul e sudoeste do país. Também inclui a Venezuela, no sul, e o Equador, onde ocupa a região oriental. A bacia alcança ainda o norte da Bolívia, o sul da Guiana e uma pequena área no sul do Suriname. Esses países compartilham a vasta e rica região da Bacia Amazônica, conhecida por sua biodiversidade e recursos hídricos.

Como mencionado, a Bacia Amazônica, é considerada uma das maiores e mais complexas redes fluviais do mundo, está situada na região noroeste da América do Sul, abrangendo principalmente o Brasil, mas também se estendendo por outros países. A descrição geográfica dos principais rios da bacia ilustra a grandiosidade e a diversidade desse sistema fluvial, Figura 7.

Figura 7 - Rede hidrográfica da Bacia Amazônica



Fonte: O autor (2024).

Ainda de acordo com a Figura 7 que destaca os principais rios da área de estudo, o Rio Negro é o maior afluente da margem esquerda do Rio Amazonas e se origina na região de Guiana, fluindo predominantemente pelo norte do Brasil e pela Colômbia antes de se encontrar com o Rio Solimões em Manaus, formando o Rio Amazonas propriamente dito. O Rio Solimões, por sua vez, é o nome dado ao segmento do Amazonas que corre a partir da confluência com o Rio Negro até o encontro com o Rio Madeira, na cidade de Tefé. Este rio é, na verdade, o tronco principal do Amazonas e é alimentado por uma vasta rede de afluentes na região ocidental da bacia.

O Rio Tapajós, um dos principais afluentes da margem direita do Amazonas, corre através da região central da bacia. Ele tem suas nascentes no estado brasileiro do Mato Grosso e atravessa o Pará, unindo-se ao Rio Amazonas em Santarém. O Tapajós é conhecido por suas águas cristalinas e pelas paisagens de grande beleza natural que acompanha seu curso. Outro afluente significativo da margem direita do Amazonas é o Rio Xingu, que nasce na região do Mato Grosso e percorre uma extensa área do Pará. Ele deságua no Amazonas próximo a Altamira e é vital para a região devido à sua importância ecológica e econômica.

O Rio Madeira, que se origina na região andina da Bolívia e flui pelo norte do Brasil, é um dos maiores afluentes do Amazonas, com um extenso percurso que inclui o território boliviano e a região norte do estado brasileiro de Rondônia. O Madeira é um dos rios mais volumosos da bacia, contribuindo significativamente para o regime hidrológico do Amazonas. Por fim, O rio Amazonas entra no território brasileiro como Rio Solimões e, em Manaus, após se encontrar com o Rio Negro e ter suas águas misturadas, adota o nome de Amazonas. Como Rio Amazonas, ele continua seu curso até desaguar no Oceano Atlântico.

5.1.1 Principais características hidrometeorológicas

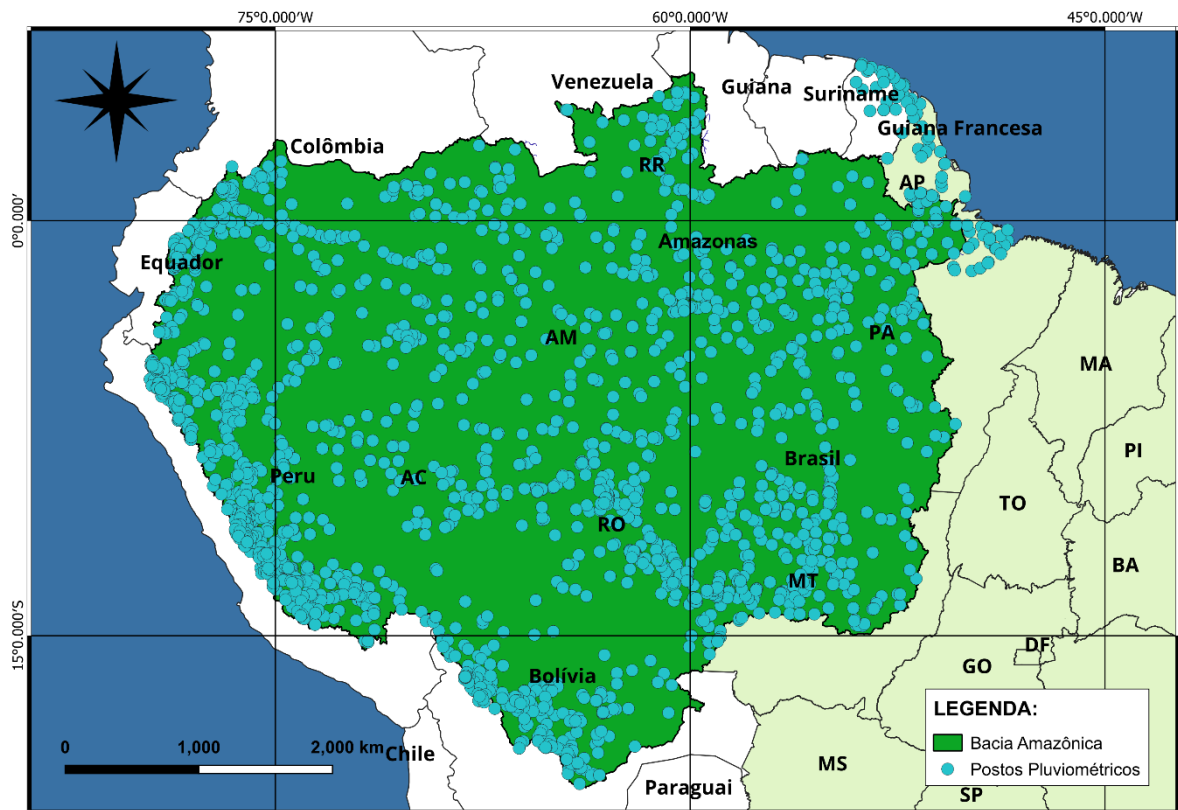
5.1.1.1 Chuva

Segundo Goldman *et al.* (2009), pesquisas apontam que a floresta amazônica realiza um papel de extrema importância na regulação do clima nas escalas global e regional. A floresta está sujeita a um processo acentuado de evapotranspiração através do qual o aquecimento intenso da superfície é disseminado para a atmosfera em forma de calor latente. A convecção excessiva sobre o continente no decorrer do verão do hemisfério sul transfere calor latente para a mais alta troposfera, atribuindo calor para a circulação atmosférica global. Dessa forma, as interações complexas entre as variáveis climáticas na bacia amazônica apresentam implicações consideráveis para a mudança climática nas escalas global e regional.

O oceano Atlântico tropical é a principal fonte de umidade para a Amazônia, contribuindo com cerca de dois terços do total. Isso ocorre por um fluxo persistente na direção sudoeste durante boa parte do ano. Esse fluxo extravia-se no sentido sul, garantindo a transferência de umidade nas altas latitudes, principalmente sob a forma de um jato de baixa altitude. Dessa maneira, a bacia amazônica é tida como uma fonte de umidade para algumas regiões, em especial as bacias do sudeste brasileiro e do Pantanal. Deste modo, alterações no balanço hídrico da bacia amazônica teriam implicações nas bacias vizinhas (Davidson *et al.*, 2012).

Os postos pluviométricos da Bacia Amazônica são fundamentais para monitorar e analisar as precipitações nesta região, uma das mais complexas e ecologicamente importantes do planeta. Apesar dos desafios enfrentados, o avanço tecnológico e os esforços colaborativos têm aprimorado a precisão e a cobertura dos dados pluviométricos, oferecendo informações cruciais para a conservação e o gerenciamento sustentável da região. Na Figura 8, abaixo, é possível observar a distribuição dos postos pluviométricos na Bacia Amazônica. A figura ilustra a rede de postos disponibilizada pela ANA, no entanto, nem todos os postos de chuva foram considerados devido a problemas com a qualidade dos dados ou à ausência deles em alguns casos. No caso de postos pluviométricos localizados fora do Brasil se constatou em diversos casos a agregação dos dados diários no último dia de cada mês, com presença de zeros nos demais dias. Foi preciso fazer um trabalho minucioso para excluir períodos ou mesmo a série inteira onde essas falhas aconteceram.

Figura 8 - Postos pluviométricos Bacia Amazônica



Fonte: O Autor (2024).

Estudo de Davidson *et al.* (2012), aborda como a precipitação na Bacia Amazônica está sendo afetada por fatores climáticos e ambientais, incluindo o desmatamento e as mudanças no uso da terra. Dentre as conclusões do estudo supracitado, pode-se destacar que os autores encontraram evidências de que a precipitação na Bacia Amazônica tem diminuído em algumas áreas, especialmente aquelas que sofreram desmatamento significativo. Além disso, mudanças no uso da terra, como a conversão para pastagens ou áreas agrícolas, também alteram a dinâmica da precipitação. Dessa forma, as alterações na precipitação na Bacia Amazônica têm implicações não apenas para a região, mas também para o clima global, já que a Amazônia desempenha um papel crucial no equilíbrio dos sistemas atmosféricos e na regulação do clima global.

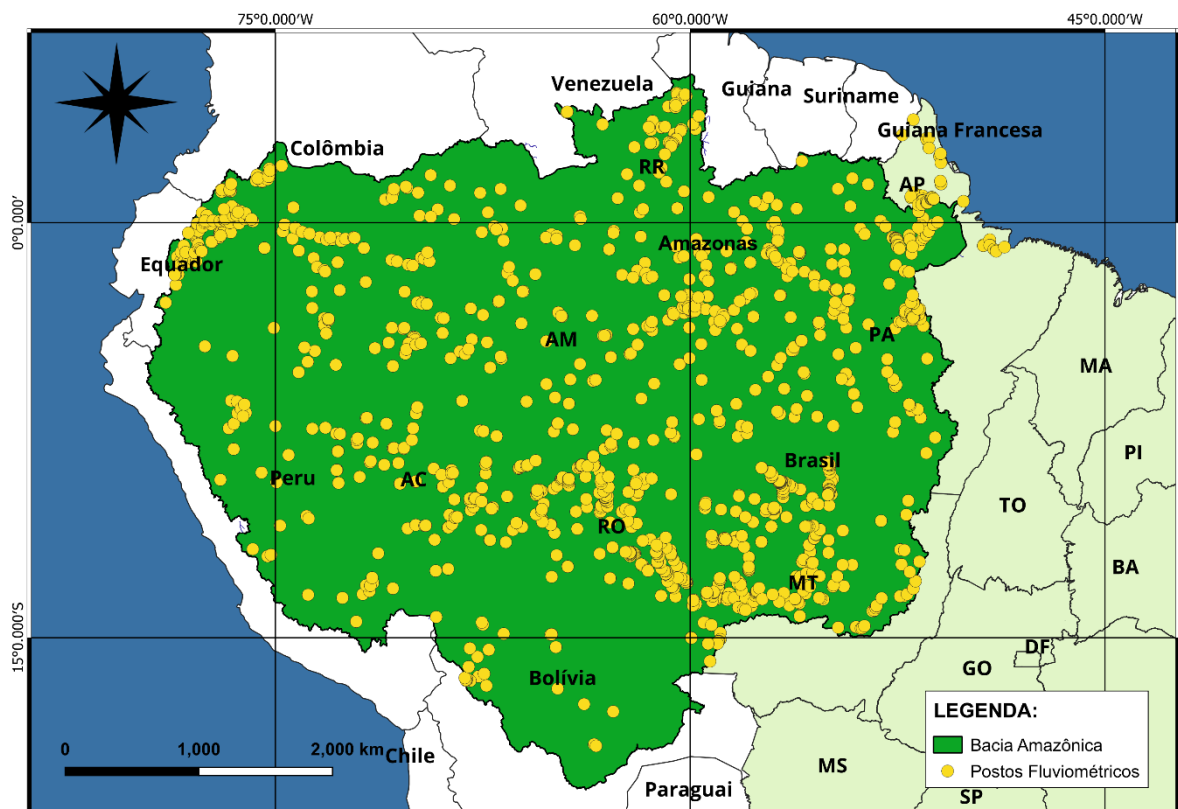
5.1.1.2 Vazão

A região amazônica dispõe de baixa declividade, as grandes contribuições dos rios levam ao desenvolvimento de fortes perturbações no escoamento, consequentemente, a aparição de curvas-chaves não-unívocas pela região. Além do mais, a maior parte dos afluentes

do Solimões/Amazonas (Tapajós, Xingu, Madeira e Negro) sofre com ação de barragem hidráulica, que pode ser analisada a centenas de quilômetros a montante da foz de cada um deles. Deste modo, o nível de água de um dos afluentes próximos de sua foz, será atribuição da vazão do Solimões/Amazonas, e não do próprio rio. Em razão do efeito da maré, a estação fluviométrica situada mais a jusante da bacia é a de Óbidos, com área de drenagem de aproximadamente 4.671 km². Diversos autores realizaram o cálculo da vazão média na foz, com valores anuais próximos a 200.000 m³/s (Ribeiro Neto, 2001).

Na Figura 9, a seguir, é possível observar a dispersão dos postos de vazão da bacia amazônica. Os postos de vazão da bacia amazônica desempenham um papel crucial na compreensão e gestão dos recursos hídricos dessa vasta e complexa região. Dessa forma, são fundamentais para a prevenção de desastres naturais, como enchentes e secas. Informações precisas sobre o comportamento dos rios permitem a emissão de alertas antecipados e a implementação de estratégias de mitigação para proteger comunidades e infraestrutura.

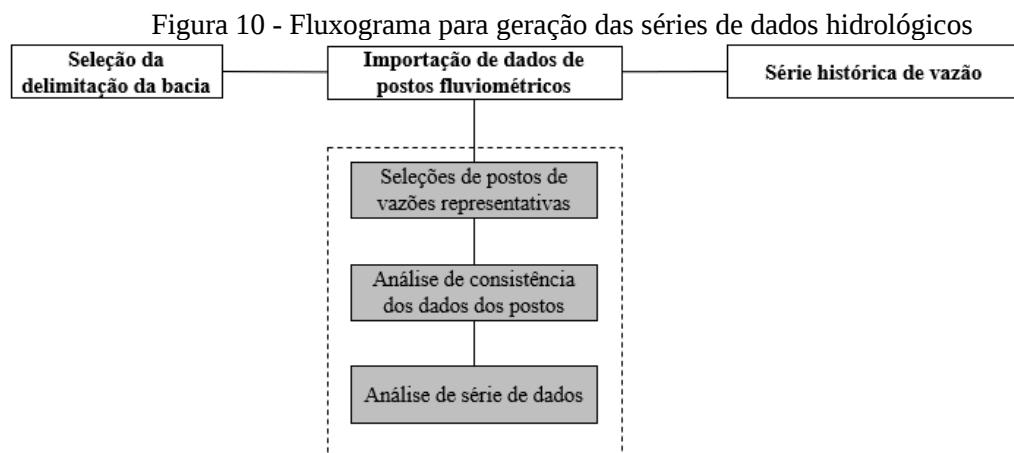
Figura 9 - Postos fluviométricos localizados na extensão da Bacia Amazônica



Fonte: O Autor (2024).

5.2 BASE DE DADOS

Por meio do QGIS foram gerados dados de geoprocessamento através do sistema de informação geográfica (SIG), usando como base os dados fotogramétricos disponíveis na plataforma do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). As séries históricas de precipitação e vazão e normais climatológicas de evaporação e evapotranspiração foram obtidas das plataformas: HidroWeb – Agência Nacional de Águas (ANA), Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). No caso de dados de chuva e vazão, a coleta é simplificada com a utilização do “plugin” Hydroweb, incorporado ao QGIS. Este software identifica todos os postos em uma região definida pelo usuário, a exemplo do contorno da bacia hidrográfica e um “buffer” para agregar os postos da vizinhança e promove o download da série histórica referente a cada posto, a partir da base de dados da ANA. Em seguida os dados são analisados e consistidos, antes de sua inserção no modelo hidrológico. A Figura 10 a seguir está representa a sequência da análise dos dados de chuva e vazão.



Fonte: O Autor (2024).

Inicialmente foi selecionado o *shapefile*, arquivo vetorial, da delimitação da Bacia Hidrográfica Amazônica, pela base de dados do IBGE, a qual fornece os limites geográficos da bacia, que servem como base para geração das sub-bacias em função dos pontos de controle de vazão ou confluência de rios. Na sequência, foi realizado uma análise dos postos de vazão baixados no HidroWeb para a região de estudo, essa verificação foi realizada para garantir a consistência e coerência dos dados usados nas simulações.

Sendo assim, a consistência da seleção dos postos foi realizada através de imagem de satélite do QGIS e vetorização da rede de drenagem da bacia, para seleção dos postos existentes

ao longo do rio Amazonas e seus afluentes com maiores contribuições de vazão. Posteriormente, foi verificada a consistência dos dados de cada posto, onde analisou-se a ocorrência de falhas e a extensão destas. Nessa análise garante-se um conjunto de dados hidrológicos mais confiáveis.

Por fim, outra verificação a se considerar é a abrangência de um período de dados considerável que resulte em uma série representativa para calibração dos parâmetros requeridos pelos modelos hidrológicos. Após respeitar todos esses critérios foram selecionados os postos fluviométricos, da base de dados HidroWeb – ANA, que correspondem a rede dos seguintes rios: Madeira; Tapajós; Xingu; Negro; Solimões e Amazonas, como indicado na Figura 11.

Figura 11 - Postos fluviométricos selecionados



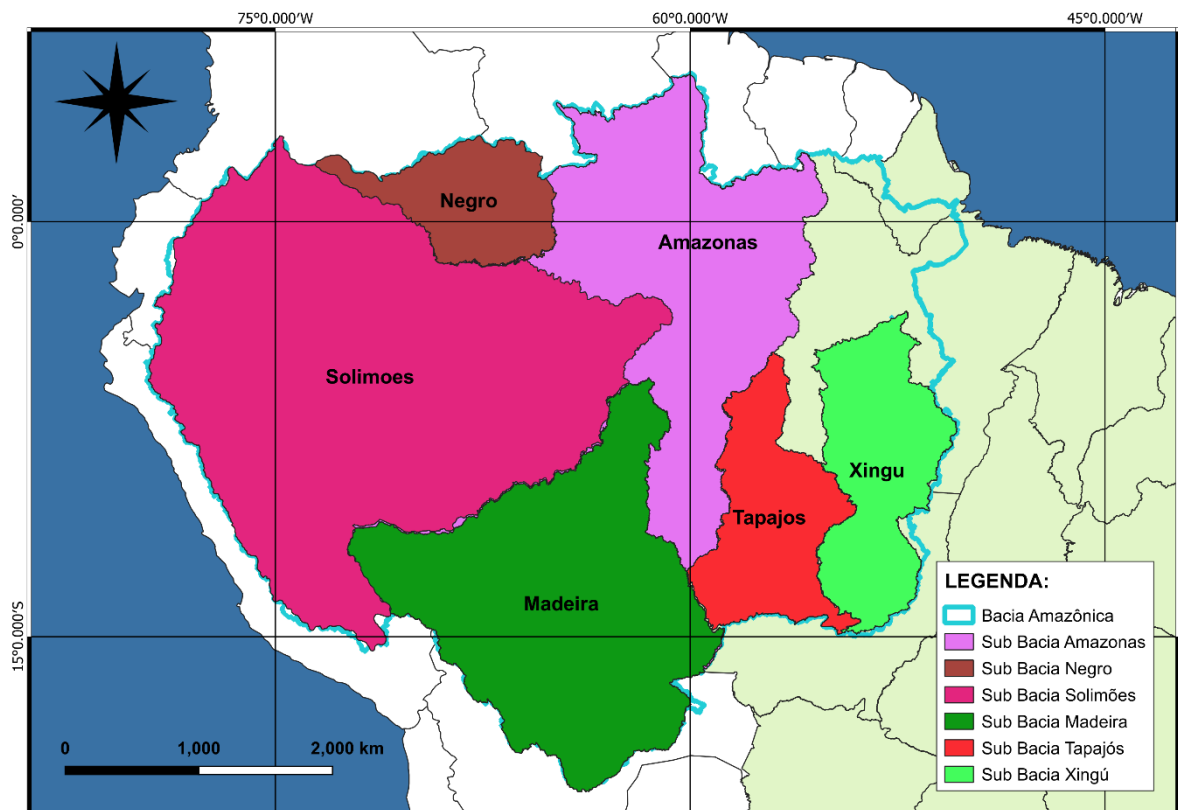
Fonte: O Autor (2024).

Para geração das sub-bacias, é necessário importar os dados de entrada como a rede de rios, os dados de elevação da área (MDE) e o posto fluviométrico, que será utilizado como ponto de referência para a geração da sub-bacia. Inicialmente, a delimitação seria realizada usando o as ferramentas do próprio QGIS. Porém, devido à grande extensão da área em questão, foi necessário fazer do software do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) para realizar essa

etapa. É importante salientar que tanto o QGIS quanto o IPH possuem características distintas que os tornam adequados para diferentes contextos e profundidades de análise. O QGIS é mais versátil e acessível para análise espacial geral, enquanto o IPH oferece ferramentas especializadas para simulação e análise hidrológica detalhada.

Com isto, foi possível gerar as sub-bacias correspondentes a área de abrangência de cada um dos postos fluviométricos selecionados, resultando nas sub-bacias dos rios: Tapajós, Solimões, Negro, Madeira, Xingú e Amazonas, como demonstrado no mapa da Figura 12. Na margem leste, os afluentes destacados são: Madeira, Tapajós e Xingu; na margem oeste, os afluentes são: Solimões, Negro.

Figura 12 - Divisão da Bacia Amazônica em sub-bacias.



Fonte: O Autor (2024).

No Quadro 2 é possível analisar os dados de cada uma das sub-bacias geradas na etapa anterior. Diante da relevância das simulações de chuva-vazão que dependem da qualidade e da abrangência dos dados de entrada, a área e o perímetro da bacia fornecem informações sobre a capacidade de coleta e a forma do escoamento, enquanto a série histórica de dados de

precipitação e vazão oferece o contexto temporal necessário para modelar e prever o comportamento hidrológico.

Quadro 2 - Postos fluviométricos da bacia hidrográfica do rio Amazonas.

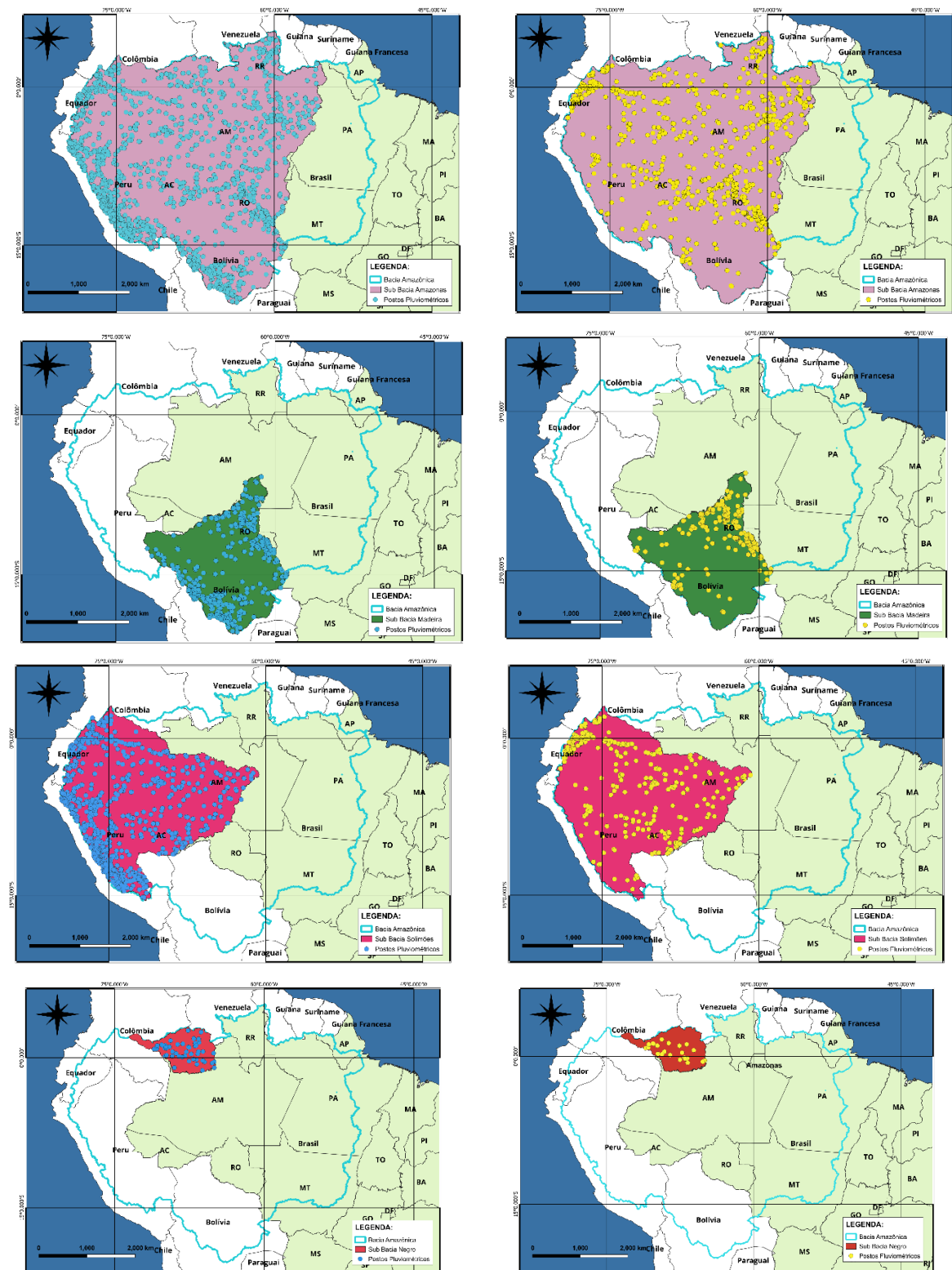
CURSO D'ÁGUA PRINCIPAL	CÓDIGO DO POSTO FLUV.	ESTAÇÃO FLUV.	ÁREA (km²)	PERÍMETRO (km)	L RIO PRINCIPAL (km)	LEITURA INICIAL	LEITURA FINAL
Rio Madeira	15700000	MANICORÉ	1.149.699,59	9.959,41	1.450	22/06/1967	31/01/2020
Rio Tapajós	17650002	ACARÁ DO TAPAJÓS	386.988,82	6.842,88	806	03/03/1996	30/09/2009
Rio Xingu	18850000	ALTAMIRA	438.962,92	7.498,08	1.640	25/11/1975	01/02/2015
Rio Negro	14420000	SERRINHA	278.651,36	4.668,17	2.250	11/09/1981	30/06/2021
Rio Solimões	14100000	MANACAPURU	2.198.553,10	8.731,92	1.700	24/10/1981	30/04/2021
Rio Amazonas	17050001	ÓBIDOS	4.681.554,86	15.952,07	6.400	29/12/1973	30/06/2021

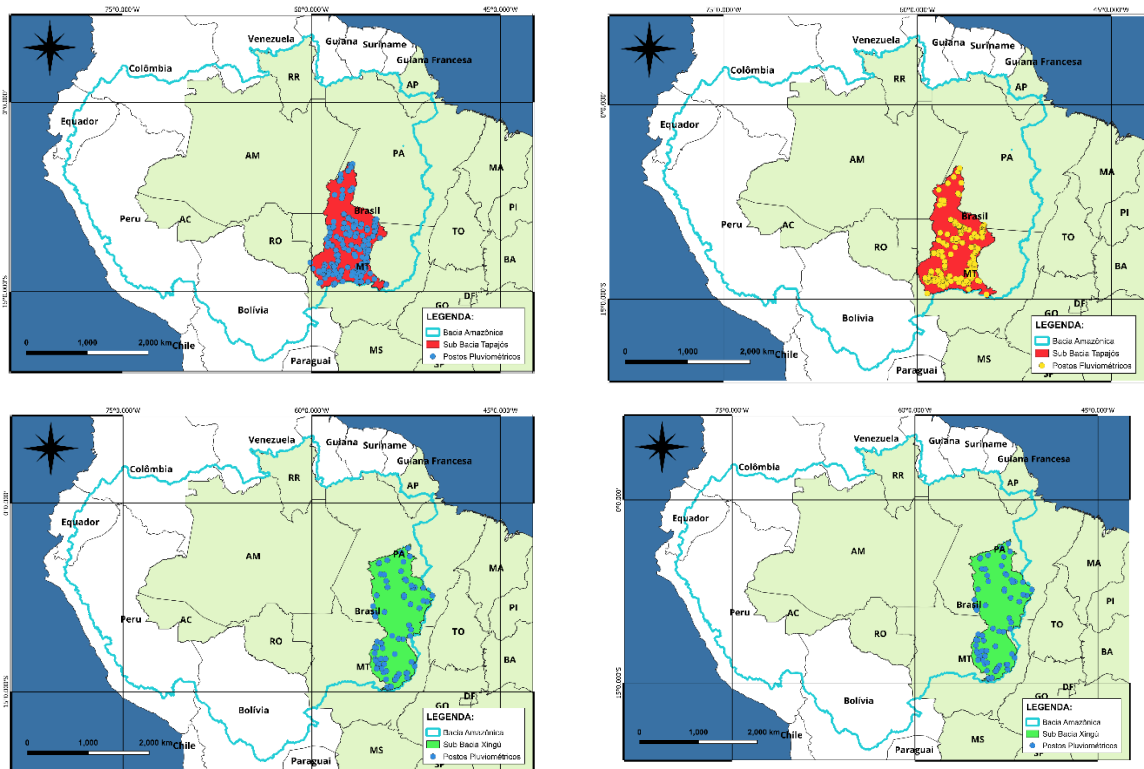
Fonte: O Autor (2024).

Na Figura 13 é possível visualizar as sub-bacias geradas na etapa anterior, incluindo seus respectivos postos de chuva e de vazão. Os postos de chuva serão analisados na fase de cálculo da precipitação média. Nesta análise, será feita uma revisão detalhada de cada posto para corrigir possíveis falhas de preenchimento e identificar erros nos dados, com o objetivo de garantir a precisão das simulações subsequentes.

Quanto aos postos de vazão, embora já tenha sido realizada a seleção dos postos mais representativos para a cada região e a delimitação da sub-bacia na etapa anterior, é importante observar a distribuição geográfica dos dados em cada área de estudo. Essa análise espacial é fundamental para entender a cobertura dos dados e assegurar que as medições de vazão estejam bem distribuídas e representem adequadamente a área em questão.

Figura 13 - Distribuição espacial de estações de pluviométricas e fluviométricas





Fonte: O Autor (2024).

5.3 CÁLCULO DE PRECIPITAÇÃO MÉDIA

A chuva média de cada sub-bacia é calculada neste estudo, com passo de tempo diário compatível com os dados e o modelo CAWM V. O modelo de interpolação utilizado para a espacialização das precipitações foi o Inverse Distance Weighting (IDW), um dos mais utilizados na análise de dados geoespaciais para estimar valores em locais onde não há medições diretas. O método IDW é uma técnica de interpolação que atribui pesos aos pontos de medição circundantes de acordo com a distância relativa a partir do ponto de referência no qual deseja-se estimar um valor. Quanto mais distante o posto a ser interpolado, menor será seu peso e influência no ponto a ser avaliado. Após a aplicação do método IDW, será obtido estimativas de chuva média em locais onde não havia medições diretas.

Conforme já referenciado, os dados dos postos pluviométricos foram importados da base de dados da ANA através do *plugin* HidroWeb Downloader do Programa QGIS. Como as sub-bacias foram delimitadas na etapa anterior, é possível extrair os dados de chuva de cada uma dessas áreas e assim calcular a chuva média. A precipitação média foi calculada através de uma Macro programada em linguagem *xlsx*, Excel, a qual possui como dados de entrada o caminho do diretório de localização dos postos importados e o centroide da região hidrográfica, com coordenadas de latitude e longitude, conforme Quadro 3, de cada sub-bacia, o que permite

que sejam calculadas as distâncias até o centróide da área para a aplicação do método IDW. Antes do cálculo da chuva média foi feita análise de valores inconsistentes de precipitações em cada um dos mais de 600 postos selecionados inicialmente. Durante a análise, foram identificados alguns postos com valores acumulados no último dia de cada mês e outros postos precipitações diárias extremamente altas, o que se entendia como um erro na leitura do dado. Dessa forma, esses postos com divergência foram corrigidos ou excluídos do restante dos conjuntos de dados.

Quadro 3 - Dados dos postos de estudo

CURSO D'ÁGUA PRINCIPAL	CÓDIGO DO POSTO FLUVIOMÉTRICO	LONGITUDE	LATITUDE
RIO MADEIRA	15700000	-65.893	-13.123
RIO TAPAJÓS	17650002	-56.554	-9.815
RIO XINGU	18850000	-52.9646	-9.0688
RIO NEGRO	14420000	-68.0933	0.7296
RIO SOLIMÕES	14100000	-70.9594	-6.2059
RIO AMAZONAS	17050001	-68.5181	-7.6471

Fonte: O Autor (2024).

5.4 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

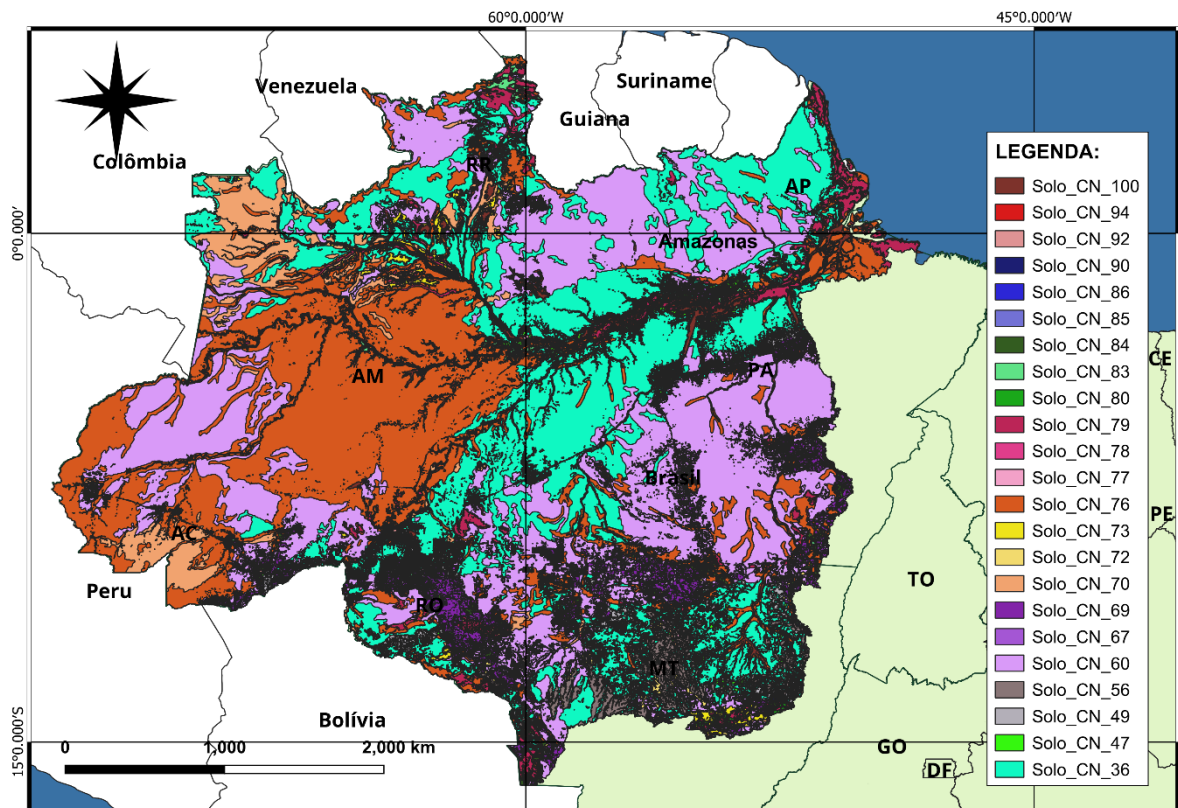
A ocupação e uso indiscriminado dos recursos naturais requer a análise dos impactos das ações antrópicas sobre o meio ambiente, principalmente quando se avalia o comportamento hídrico das bacias hidrográficas, onde as alterações das superfícies naturais influenciam o escoamento e a infiltração das águas de chuva. Deste modo, o mapeamento do uso e ocupação do solo permite avaliar as alterações ambientais e como estas alteram o comportamento natural da área em estudo (Fiorese, 2021).

O mapa, em arquivo vetorial, de uso e ocupação de solo da bacia hidrográfica amazônica foi importado da base de dados da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2013), que utiliza o sensoriamento remoto para classificar as superfícies do solo e através das formas, texturas, localização e arranjo das áreas, e, as tonalidades que define o tipo de cobertura. Diante dessa classificação, é atribuído um *Curve Number* (CN) a cada tipo de cobertura identificado.

O método *Curve Number* (CN), desenvolvido pelo SCS (Soil Conservation Service, 1957), é um dos métodos mais utilizados para determinar a parcela correspondente ao escoamento superficial diante de um evento pluviométrico. Seu valor é baseado no uso, ocupação e classe hidrológica do solo da bacia hidrográfica, com magnitude variando de 0 a 100, sendo os valores mais baixos, áreas permeáveis e os superiores áreas impermeáveis (ANA, 2018).

Na extensão da Bacia Amazônica localizada no território brasileiro o *Curve Number* varia de 36 até 100, como mostrado no mapa de uso e ocupação do solo da Figura 14.

Figura 14 - Valores de Curve Number para o solo da Bacia Amazônica



Fonte: Adaptado EMBRAPA 2013.

Através do QGIS, foi efetuado o recorte correspondente de cada sub-bacia estudada. Na tabela de atributos contém informações como o tipo de solo a área e o CN correspondente a cada parcela de tipologia do solo. Em seguida foi calculado o valor de CN de referência por meio da média ponderada da área de cada unidade de solo e posteriormente foram calculados os valores de S, conforme equação já explicitada. De acordo com o Quadro 4, observou-se que os valores de S variaram em uma faixa bastante próxima, com um máximo de 154 e um mínimo

de 150. O que indica que o solo possui uma boa estrutura e capacidade de infiltração devido a cobertura vegetal densa, como a encontrada na floresta Amazônica, o que ajuda a reduzir o escoamento superficial.

Quadro 4 - Valores de CN e S para cada sub-bacia estudada.

CURSO D'ÁGUA PRINCIPAL	CÓDIGO DO POSTO FLUVIOMÉTRICO	CN	S
Rio Madeira	15700000	62,844	150,175
Rio Tapajós	17650002	62,783	150,571
Rio Xingu	18850000	62,764	150,690
Rio Negro	14420000	62,180	154,494
Rio Solimões	14100000	62,826	150,209
Rio Amazonas	17050001	62,861	150,065

Fonte: O Autor (2024).

5.5 DADOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A evapotranspiração potencial (ET₀) é uma medida crucial para entender o ciclo hidrológico e a demanda de água nas diferentes regiões do mundo. Dessa forma, os dados de evapotranspiração adotados neste estudo, são um conjunto de dados geoespaciais detalhados sobre a evapotranspiração potencial. Esse conjunto de dados encontra-se disponível no CGIAR-CSI GeoPortal (Consórcio de Informação Espacial do Consultative Group for International Agricultural Research), e que contou com o apoio do National Key Basic Research Program e da National Science Foundation da China (CGIAR-CSI, 2022). O CGIAR-CSI é uma iniciativa colaborativa que integra diversas comunidades globais focadas em ciência, pesquisa e desenvolvimento. Este consórcio une cientistas do CGIAR, parceiros nacionais e internacionais, além de outros especialistas comprometidos com a aplicação e promoção da ciência geoespacial.

Para o referido estudo os dados globais extraídos no formato *raster*, para o período de 1970-2000 e resolução (30 segundos de arco) do banco de dados Global-ET₀_monthly_v3 que é gerenciado e disponibilizado (CGIAR-CSI, 2022). Os dados obtidos são determinados de acordo com a abordagem da Equação FAO-56 *Penman Monteith Reference Evapotranspiration* (ET₀), definida pela expressão abaixo:

$$ET_0 = \frac{\left(0,408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T_{avg} + 273}\right) \times u_2 \times (e_x - e_a)\right)}{(\Delta + \gamma * (1 + \left(\frac{r_s}{r_a}\right))} \quad (26)$$

Onde:

ET_0 é a evapotranspiração para a cultura de referência, como mm/dia;

R_n é a radiação líquida na superfície da cultura, como $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$;

G é a densidade do fluxo de calor do solo, como $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$;

T_{avg} é a temperatura média diária do ar a 2 m de altura, como $^{\circ}C$;

u_2 é a velocidade do vento a 2 m de altura, como $m\ s^{-1}$;

e_s é a pressão de vapor de saturação, como kPa;

$(e_s - e_a)$ é o déficit de pressão de vapor de saturação, como kPa;

e_a é a pressão de vapor real, como kPa;

Δ é a curva de inclinação da pressão de vapor, como $kPa\ ^{\circ}C^{-1}$;

γ é a constante psicrométrica, como $kPa\ ^{\circ}C^{-1}$;

r_s é a resistência da superfície, como $m\ s^{-1}$;

r_a é a resistência aerodinâmica, como $m\ s^{-1}$.

A equação de Penman-Monteith, desenvolvida pela FAO e descrita por Allen *et al.* (1998), em seu trabalho conhecido como FAO 56, é amplamente reconhecida como o método padrão para a estimativa da evapotranspiração potencial (ET_0). Este método, consolidado por Walter *et al.* (2000), define a evapotranspiração potencial (PET) como a evapotranspiração de uma cultura de referência em condições ideais de disponibilidade de água e parâmetros climáticos. A FAO 56 fornece uma base robusta para calcular a evapotranspiração potencial ao considerar uma série de variáveis meteorológicas, como radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento, ajustadas para um referencial padrão de cultura.

O método FAO-56 é fundamentado em princípios físicos, o que o torna amplamente aplicável em escala global, pois não requer a estimativa de parâmetros locais adicionais. Deste modo, a equação de Penman-Monteith pode ser utilizada para estimativas globais pois não requer parâmetros adicionais da área a ser avaliada, já que leva em consideração dados de radiação, fluxo de calor, temperatura média, velocidade do vento, dados de pressão e resistências de superfície e aerodinâmica. Sendo assim, a evapotranspiração potencial é abordada na equação 26 considerando uma cultura de referência que consiste em grama bem regada, com altura definida em 12 cm, uma resistência de superfície fixa de 70 s/m e um albedo de 0,23 (Allen *et al.*, 1998).

Cabe ressaltar, que para a aplicação dos dados de evapotranspiração global foi necessário reprojeter o arquivo *raster* para o sistema de coordenadas SIRGAS 2000, de modo

que todas as camadas utilizadas no recorte e importação dos dados tenham o mesmo sistema de referência. Abaixo, no Quadro 5 estão indicados os dados de evapotranspiração: máximo, mínimo e médio, retornados pelo QGIS para cada uma das sub bacias definidas neste estudo. Com os valores da média mensal, serão calculados os valores de evapotranspiração média diária para cada sub-bacia de interesse.

Quadro 5 - Dados de evapotranspiração de referência para cada sub-bacia

SUB-BACIA	EVAP GLOB	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Madeira	Máx.	173	155	156	148	144	133	166	190	207	213	193	186
	Mín.	81	70	80	78	76	73	82	91	84	94	93	86
	Média	107,7	98,1	108,1	104,6	110,3	111,1	132,8	147,2	145,0	143,7	126,2	115,3
Tapajós	Máx.	118	106	114	120	134	148	175	183	158	161	141	126
	Mín.	86	75	84	82	92	98	114	133	122	120	100	89
	Média	94,7	84,2	92,5	98,3	113,7	123,4	147,4	153,6	133,2	132,9	111,4	99,9
Xingu	Máx.	116	104	117	124	137	147	172	183	159	163	143	127
	Mín.	83	73	79	81	93	104	124	139	124	122	100	90
	Média	95,0	84,2	92,6	100,2	116,5	126,8	147,4	159,6	138,8	136,2	110,7	99,9
Negro	Máx.	164	157	160	138	125	121	136	153	170	177	155	142
	Mín.	86	78	93	85	83	80	85	94	99	107	93	86
	Média	116,8	110,8	118,4	103,3	98,9	98,3	111,6	124,8	128,7	129,3	118,0	114,6
Solimões	Máx.	149	145	138	147	139	134	143	157	150	169	166	156
	Mín.	59	49	58	57	60	52	51	54	57	61	61	60
	Média	100,8	90,0	96,2	91,5	97,1	95,1	107,5	117,6	116,2	114,6	105,8	101,7
Amazonas	Máx.	173	157	160	148	144	134	166	190	207	213	193	186
	Mín.	59	49	58	57	60	52	51	54	57	61	61	60
	Média	105,8	96,1	104,1	98,1	102,0	101,8	117,6	129,7	129,3	128,6	116,0	108,9

Fonte: O Autor (2024).

5.6 ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Na presente pesquisa, com o intuito de melhorar a precisão da modelagem dos dados de entrada das bacias calibradas e estabelecer uma relação entre a bacia principal e a sub-bacia em análise foi utilizada a plataforma *Google Earth Engine* para acessar e baixar dados de satélites diretamente de seu banco de dados.

A plataforma *Google Earth Engine* é um sistema operacional de processamento e análise de dados geoespaciais baseada em nuvem desenvolvida pelo Google. O principal objetivo facilitar a análise em larga escala de dados geoespaciais e lidar com grandes volumes de dados, ela oferece acesso a uma vasta coleção de imagens de alta resolução de satélite e dados ambientais, incluindo séries temporais de imagens de satélites como *Landsat* e *Sentinel*

(Mutanga; Kumar, 2019). O estudo de Hird *et al.* (2017), exploram o uso da plataforma Google Earth Engine (GEE) para analisar zonas úmidas em larga escala. Os resultados evidenciam o *Google Earth Engine* (GEE) como uma ferramenta poderosa para o estudo de zonas úmidas, oferecendo acesso a dados históricos e em tempo real, o que facilita a análise das tendências e a visualização das mudanças.

Dessa forma, agregado a plataforma do GEE existem diversos satélites e reanálises climáticas. Para o estudo foi utilizado o ERA5, que é uma das fontes de dados climáticos disponíveis na biblioteca do *Google Earth Engine*. Essa por sua vez, é uma reanálise climática desenvolvida pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) que produziu sua mais recente reanálise a *European Centre for Medium Range Forecast ReAnalysis 5* (ERA5) (Hersbach *et al.*, 2020).

Os dados ERA5 disponíveis no GEE possui boa capacidade em representar uma ampla gama de variáveis climáticas e ambientais como, como velocidade do vento, temperatura do ar, precipitação e evapotranspiração, em diversas regiões ao redor do mundo, incluindo o Brasil (Souza; Reboita, 2020; Ullah *et al.*, 2021). O ERA5 oferece dados com uma resolução espacial de aproximadamente 30 km e uma cobertura temporal que vai desde 1950 até o presente, com atualizações regulares.

Oliveira *et al.* (2021), conduziram um estudo sobre a variabilidade climática na bacia do Rio Capibaribe, em Pernambuco, utilizando dados de precipitação e temperatura das bases de dados ERA5/ECMWF e IMERG/NASA. Embora os dados de precipitação do IMERG tenham demonstrado uma consistência superior em comparação com o ERA5, o estudo revelou um considerável potencial na aplicação de bases de dados de reanálise, como o ERA5/ECMWF, juntamente com estimativas de precipitação derivadas de sensores orbitais, como o IMERG/NASA, para a análise climática.

Por fim, os dados de escoamento superficial extraídos pelo Google Earth Engine do ERA 5 foram utilizados para estabelecer o processo de transferência dos parâmetros para as bacias aninhadas. As séries de dados do ERA 5 foram correlacionadas entre a bacia principal calibrada e a sub-bacia aninhada, fornecendo uma função linear e o coeficiente angular, que é considerado na estimativa do volume total escoado para a bacia aninhada.

A transferência de parâmetros entre bacias aninhadas envolve os dados da bacia calibrada, sendo: lâmina da vazão observada total (mm) e o número da série histórica (dias). Para estimar a lâmina observada total (mm) da bacia não calibrada, sendo assim, é necessário realizar a seguinte correlação:

$$Q_{obs}(2) = Q_{obs}(1) * Q_{esp} * \left(\frac{N1}{N2}\right) \quad (27)$$

Onde:

$Q_{obs}(2)$: Lâmina da vazão observada total da bacia não calibrada (mm);

$Q_{obs}(1)$: Lâmina da vazão observada total da bacia calibrada (mm);

Q_{esp} : É o coeficiente angular da função que representa a relação entre as bacias calibrada e não calibrada obtidos através do gráfico de dispersão dos dados de escoamento superficial extraídos do satélite;

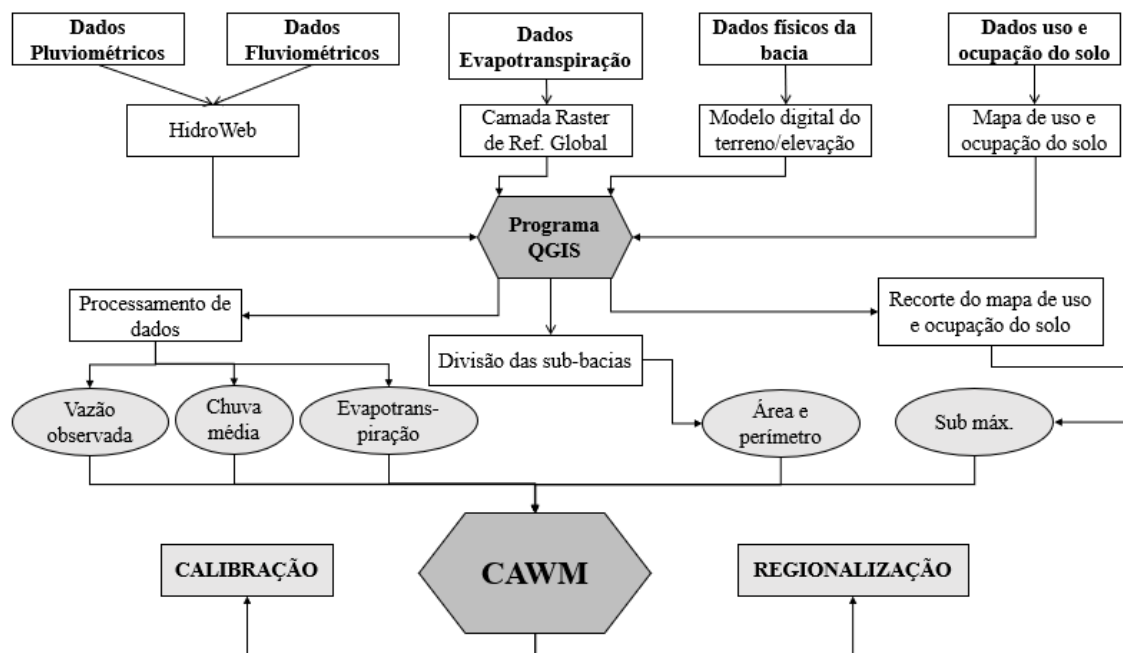
$N1$: Número da série histórica da bacia calibrada em dias;

$N2$: Número da série histórica da bacia não calibrada em dias.

5.7 APLICAÇÃO DO MODELO CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL (CAWM)

Após a apresentação dos dados preliminares discutidos nos tópicos anteriores, com a obtenção de um conjunto de dados suficiente, procede-se à aplicação dos modelos CAWM para a calibração, validação e regionalização das sub-bacias aninhadas. Para facilitar a compreensão da etapa metodológica final, foi elaborado o fluxograma que consolida a estrutura desde a coleta de dados preliminares até a obtenção dos resultados, conforme Figura 15.

Figura 15 - Fluxograma do modelo hidrológico CAWM



Fonte: O Autor (2024).

A base de dados de elevação utilizada, para a obtenção dos elementos topográficos foi proveniente da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), (EMBRAPA, 2013). Este conjunto de dados, obtido por meio de um radar espacial durante uma missão da NASA e da Agência Espacial Alemã, e oferece informações detalhadas sobre a elevação do terreno com uma resolução global de 30 metros. A precisão e a cobertura deste banco de dados foram essenciais para a análise do relevo e para a realização de modelagens topográficas detalhadas na região em estudo.

Os modelos foram executados em passo de tempo diário, utilizando as principais sub-bacias para calibração, seguindo uma abordagem de amostras divididas, onde os primeiros 60% serão usados para calibração e os 40% restantes para validação. A função objetivo dos modelos é formulada como a maximização do coeficiente Nash-Sutcliffe (NSE).

5.8 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS

Dado que o mapeamento de solos disponível não cobre informações para regiões fora do Brasil, o cálculo do parâmetro S foi realizado exclusivamente para a porção do território brasileiro. Essa abordagem é justificada pela predominância e relevância da área brasileira para o estudo em questão, garantindo que as análises e modelagens sejam baseadas em dados representativos e relevantes para a região de interesse.

Em relação à evapotranspiração, foi necessário realizar um procedimento de ajuste dos cálculos para refletir com maior precisão as condições específicas da região em estudo. A evapotranspiração calculada para a área demonstrou valores elevados, como evidenciado pelo balanço global que resultou em coeficientes K_L negativos. Reiterando o que foi mencionado anteriormente, o coeficiente K_L é utilizado para quantificar as perdas adicionais de água na região, conforme Equação 28. Esse fenômeno já foi documentado em pesquisas anteriores, como o estudo de Oliveira (2023), que abordou condições semelhantes em outras regiões hidrográficas. Para adequar os resultados ao modelo, foi aplicado um fator redutor de 0,6. Este fator é multiplicado pela evapotranspiração de referência (ECA) para calcular a evapotranspiração potencial (ETP) ajustada.

$$K_L = \frac{V_{Prec} - V_{Qobs} - V_{Evap}}{V_{Prec} - V_{Evap}} \quad (28)$$

5.9 REGIONALIZAÇÃO DE PARÂMETROS

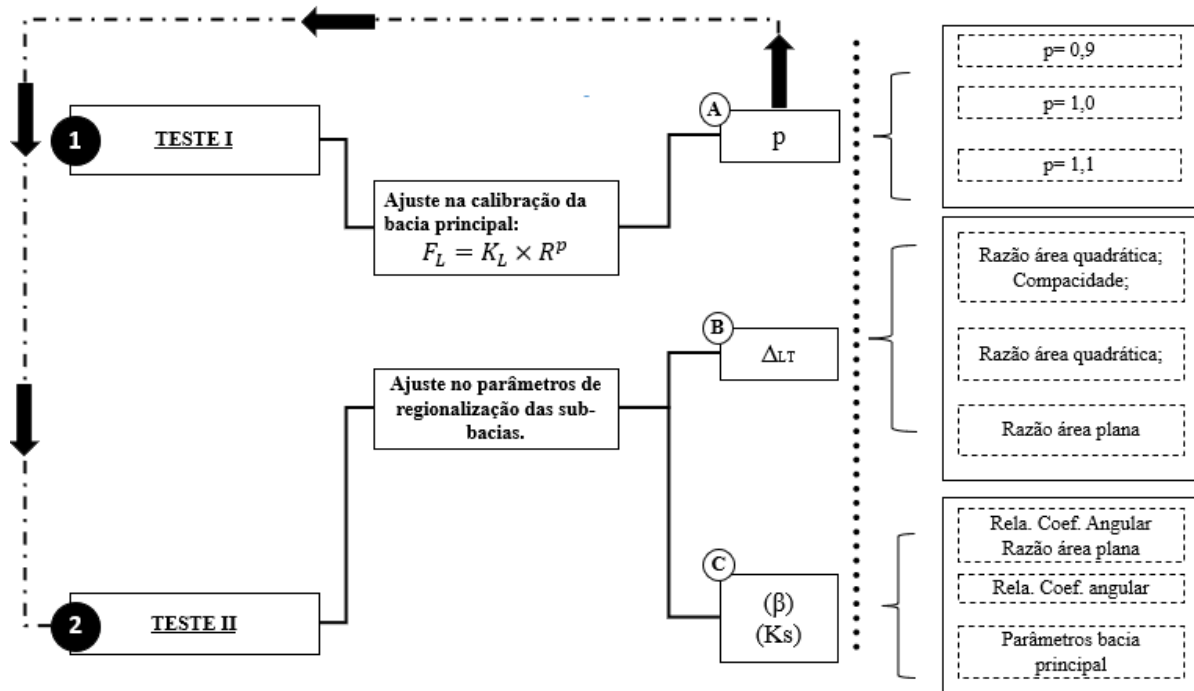
Em relação à transferência de valores de parâmetros da bacia principal para as sub-bacias tem sido feita preliminarmente as seguintes considerações.

O termo F_L representa as perdas de água que ocorrem nos sistemas e K_L é o coeficiente da perda de água. “ p ” é um parâmetro que ajusta a modelagem para refletir perdas de água mais significativas quando há extravasamento na calha da rede fluvial.

Assim, o primeiro ajuste no modelo envolveu a testagem de diferentes valores para o coeficiente p que normalmente variam entre 0,9 e 1,1, conforme ilustrado na Figura 16 (TESTE I-A). A decisão foi calibrar a bacia principal e suas sub-bacias para avaliar como os demais parâmetros respondem à variação do coeficiente de recarga. Para isso, foram selecionados os valores 0,9; 1 e 1,1 para o coeficiente p . Esses valores foram testados para garantir o melhor comportamento hidrológico do modelo e assegurar uma melhor adequação dos parâmetros do sistema em relação às condições observadas.

Após a calibração do modelo para a bacia principal, os parâmetros calibráveis, como o coeficiente de recarga β , taxa de percolação no solo K_s e ainda o parâmetro ajustável tempo de defasagem (lag-time), foram utilizados como referências para a regionalização das sub-bacias. Antes de aplicar esses parâmetros na regionalização, e após obter o melhor resultado no teste 1, foi realizado o teste 2 para determinar a melhor abordagem para ajustar os parâmetros da bacia principal para cada sub-bacia. Na Figura 16 é demonstrado o fluxograma de realização dos testes e a relação dos parâmetros usados na regionalização.

Figura 16 - Fluxograma de teste com os parâmetros de regionalização



Fonte: O Autor (2024).

No teste II-B, para o cálculo do *lagtime*, foram conduzidos três testes distintos para analisar como diferentes fatores afetam o tempo de defasagem da bacia principal. No primeiro teste, o foco foi relacionar o tempo de defasagem com a razão quadrática entre as áreas da bacia principal e da sub-bacia, multiplicada pelo *lagtime* da bacia principal, além de considerar a relação de compacidade entre elas. Este teste buscou uma compreensão abrangente ao incluir tanto a razão das áreas quanto a compacidade, que pode influenciar a resposta hidrológica da bacia. No segundo teste, a análise foi ajustada para manter apenas a razão quadrática entre as áreas da sub-bacia não calibrada e a bacia principal, multiplicada pelo *lagtime* da bacia principal, excluindo a variável de compacidade. Esta abordagem foi adotada para avaliar o impacto da razão das áreas sem a influência da compacidade. No terceiro teste, foi feita uma análise ainda mais simplificada, considerando apenas a relação entre as áreas das bacias, multiplicada pelo *lagtime* da bacia principal, e mantendo a compacidade fora da equação. Esses testes foram realizados para determinar a importância relativa de diferentes fatores, como a razão entre áreas e a compacidade, no cálculo do *lagtime* da bacia principal.

No teste II-C, foram realizadas simulações para avaliar o impacto das variáveis de coeficiente de recarga (β) e taxa de percolação no solo (K_s), na calibração do modelo. Para identificar a melhor configuração, essas variáveis foram analisadas em relação ao coeficiente angular da função que descreve a relação entre as bacias calibrada e não calibrada. Esse

coeficiente foi extraído do gráfico de dispersão dos dados de escoamento superficial obtidos a partir do satélite ERA 5. Através dessa análise, buscou-se determinar como essas variáveis influenciam a correspondência entre as bacias ajustadas e as não ajustadas, e como podem ser otimizadas para melhorar a calibração do modelo. Além do teste mencionado, também foram realizados teste considerando a relação do coeficiente angular acrescido da razão da área da sub-bacia e não calibrada. E por fim, considerou-se apenas os parâmetros obtidos diretamente da bacia principal após calibração.

Após realização da testagem mencionada anteriormente e definidos os parâmetros como o coeficiente de recarga (β), taxa de percolação no solo (K_s) e o parâmetro ajustável tempo de defasagem (*lag-time*), o processo de regionalização da bacia principal com as sub-bacias foi iniciado.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS HIDROLÓGICOS

Para este estudo, foi realizada a calibração e validação dos parâmetros do modelo CAWM, tanto para a bacia principal quanto para cada uma das cinco sub-bacias. Além disso, foram feitas considerações específicas para a modelagem hidrológica. Na tabela 1, apresenta-se um resumo consolidado das principais variáveis consideradas e resultados específicos no processo de calibração hidrológica, destacando os aspectos essenciais para a correta execução da modelagem. Vale ressaltar que a calibração foi executada em tempo diário, seguindo uma abordagem de amostras divididas, onde os primeiros 60% dos dados serão usados para calibração e os 40% restantes para validação e essa condição segue para as posteriores modelagens.

Tabela 1 - Parâmetros considerados e ajustáveis na calibração

VARIÁVEIS	AMAZONAS	MADEIRA	SOLIMÕES	NEGRO	XINGU	TAPAJÓS
$\Delta_{LT}(\text{dias})$	90	60	90	48	41	31
p	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
K_L	0,168	0,352	0,023	0,161	0,517	0,428
$S - SUB_{\text{máx}}$	150,065	150,173	150,290	154,494	150,690	150,571
K_s	0,008	0,009	0,008	0,022	0,019	0,008
β	6,000	2,400	6,000	1,876	3,605	2,686

Fonte: O Autor (2024).

É relevante destacar que, desde o primeiro teste realizado, observou-se a importância das perdas de água nos sistemas K_L , representadas pelo coeficiente de perda de água (p). Esse coeficiente é um parâmetro essencial na calibração do modelo. Durante o processo de calibração das bacias do estudo, identificou-se que o melhor ajuste foi obtido com o valor de $p=0,9$ para a bacia principal e $p=1,0$ para as demais bacias. Com base nesses resultados, este valor foi adotado para as etapas de calibração e regionalização.

6.1.1 Calibração e validação da bacia do Rio Amazonas

Ao analisar cada uma das bacias em estudo, iniciou-se pela bacia do Rio Amazonas, que corresponde à bacia principal do estudo e tem como posto fluviométrico a estação 17050001 e engloba a extensão do leito principal do Rio Amazonas.

Em relação às métricas de desempenho, os valores são demonstrados na tabela 2, para avaliar a precisão da calibração e simulação hidrológica realizadas. É possível observar o valor de 0,70 e 0,89 para o Coeficiente de Eficiência de Nash Sutcliffe (NSE) e de -0,29 e -1,52 e

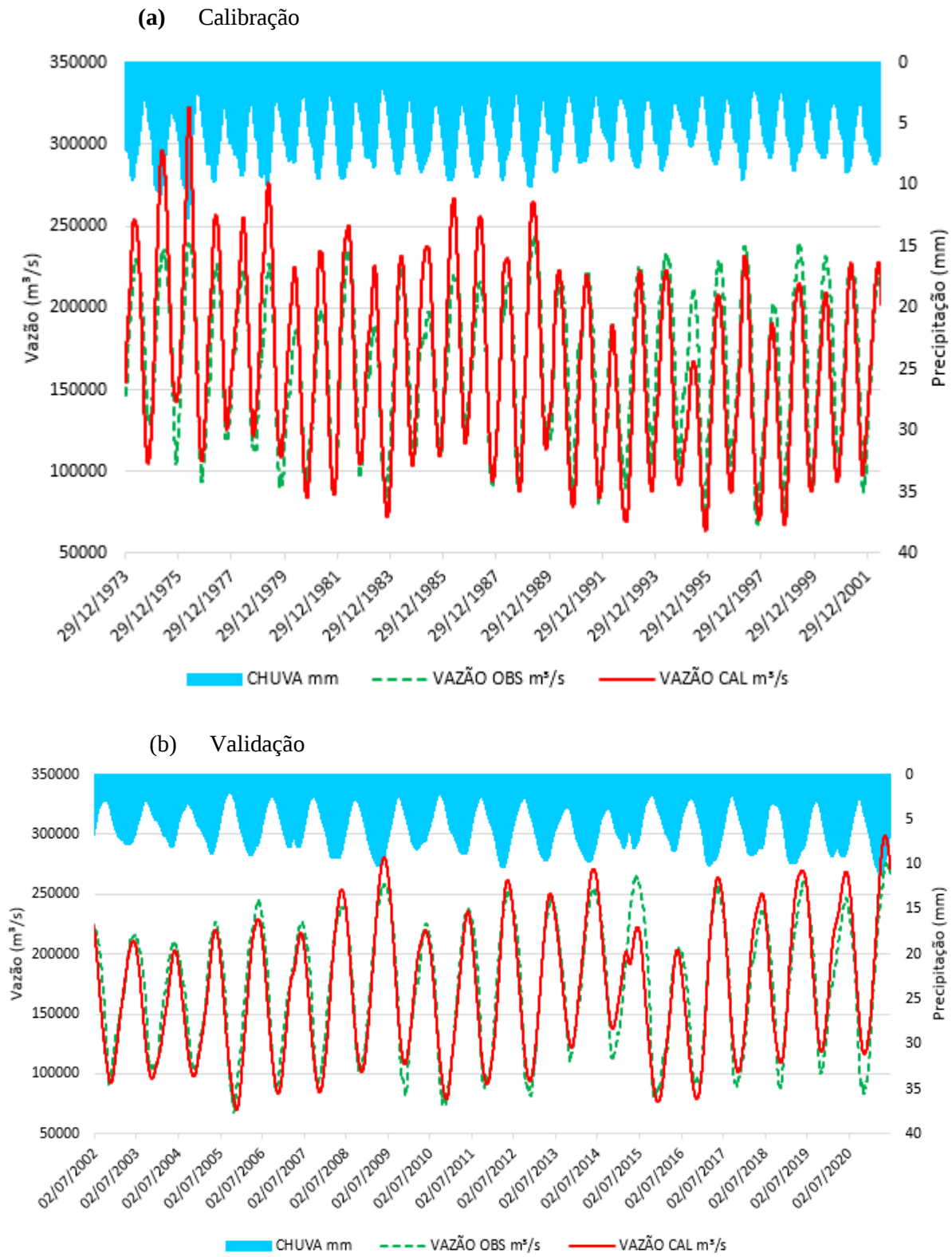
para o Índice de Viés Percentual (PBIAS), para calibração e validação, respectivamente. O índice NSE obtido durante a fase de calibração do modelo CAWM é considerado com uma eficiência muito boa. Em relação ao resultado do cálculo do PBIAS, de baixa magnitude, indicam boas simulações, o que significa que as vazões simuladas estão próximas das vazões observadas. Além disso, o valor foi negativo indica que as vazões calculadas são um pouco superestimadas em relação às vazões observadas (Moriasi *et al.*, 2007).

Tabela 2 - Métricas de desempenho bacia do rio Amazonas		
AMAZONAS (17050001)	CALIBRAÇÃO	VALIDAÇÃO
Período completo: Data inicial	29/12/1973	02/07/2002
Período completo: Data final	01/07/2002	30/06/2021
Vazão média observada (m³/s)	166214,71	173763,34
Vazão média calculada (m³/s)	165732,87	171128,90
Coefficiente de eficiência Nash-Sutcliffe - NSE	0,70	0,89
NSE considerando a raiz quadrada dos valores - NSEsqr	0,73	0,90
NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog	0,75	0,89
Percentual de tendência - Pbias	-0,29	-1,52
Raiz do erro médio quadrático - RMSE	24360,77	17399,06
Erro médio absoluto - MAE	19487,99	13948,09
Razão entre o RMSE e o desvio padrão - RSR	0,55	0,33
Coefficiente de determinação - R²	0,81	0,90

Fonte: O Autor (2024).

A Figura 17 ilustra o hidrograma das vazões calculadas e observadas de acordo com os dados diários considerando como função objetivo da validação a *Max (NSE/MAE)* e como método de otimização o *GRG Nonlinear*, para a bacia principal, Amazonas na calibração e validação. Pode-se observar que há uma correlação direta entre os dados pluviométricos registrados e os picos de vazões observadas. Esse fato é evidenciado pelo aumento dos volumes de precipitação, quanto maiores são as chuvas (em 2009, com uma média de 10,29 mm), mais elevados são os picos de vazão. Durante os períodos de estiagem, observa-se uma diminuição na curva de vazão, refletindo a redução no escoamento superficial. Além disso, a Figura 17 retrata os valores obtidos para os NSE auxiliares (NSEsqr e NSElog) que representa boa adequação das altas e baixas vazões, respectivamente.

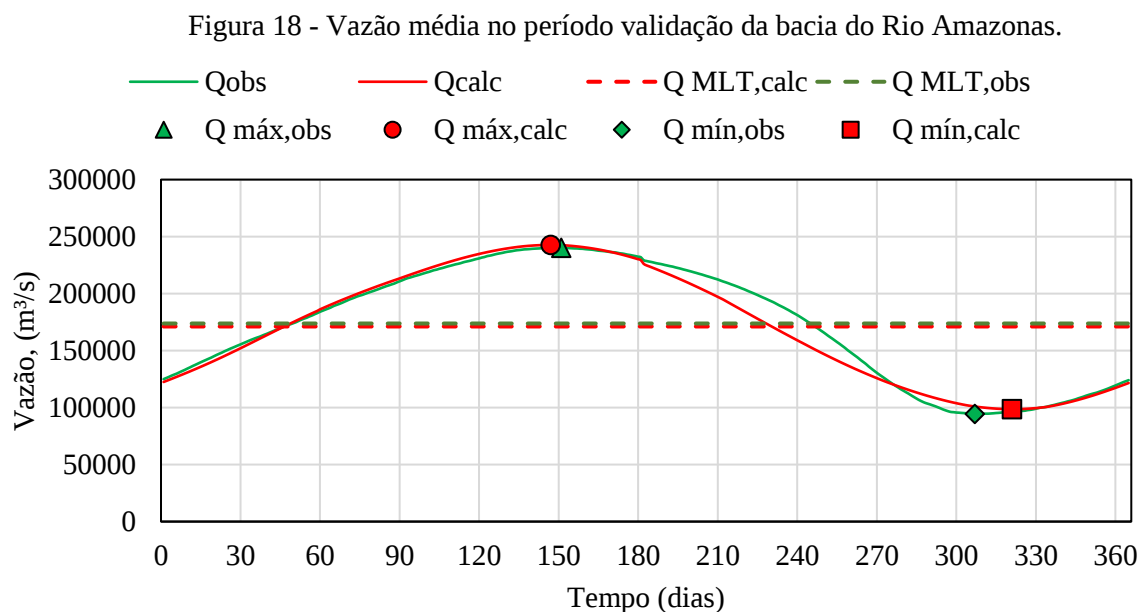
Figura 17 - Hidrogramas de Calibração (a) e Validação (b) da bacia do Rio Amazonas



Fonte: O Autor (2024).

A Figura 18 tem-se o comportamento do modelo mostrando as vazões observadas e calculadas para a série histórica usada como validação ao longo do período do ano juliano, onde é possível notar que os picos de vazão máxima ocorrem em dias bastante próximos. Entenda-se que o ano juliano traduz a média dos dados de todos os dias 1 de janeiro, 1 de fevereiro etc. Tal representação é útil para registrar a fidelidade do modelo à sazonalidade dos dados. A vazão calculada apresenta seu pico médio no dia 147, com um valor de $242.670 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto a vazão observada atinge seu máximo no dia 151, com um valor de $240.172 \text{ m}^3/\text{s}$. Essa proximidade entre os picos indica que o CAWM é eficaz na reprodução das características temporais das vazões máximas.

Além disso, é importante ressaltar a proximidade das médias das vazões ao longo do ano juliano. A média da vazão observada é de $173.770 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto a média da vazão calculada é de $171.134 \text{ m}^3/\text{s}$. Essa proximidade nas médias sugere que o modelo CAWM está bem ajustado para representar as condições gerais do fluxo ao longo do ano.



Fonte: O Autor (2024).

Além disso, a Figura 18 demonstra que tanto as séries temporais de vazões observadas quanto as calculadas pelo modelo estão bastante próximas, evidenciando um desempenho satisfatório do CAWM. Esta proximidade sugere que o modelo é eficaz na replicação das dinâmicas hidrológicas do sistema, capturando adequadamente as variações de vazões, especialmente nos picos de vazão e nas condições de estiagem.

6.1.2 Calibração e validação da bacia do Rio Madeira

Na bacia do Rio Madeira, identificada pelo posto fluviométrico a estação 17570000, no que tange às métricas de desempenho apresentadas na Tabela 3, observa-se que os coeficientes de NSE são bastante elevados, com valores de 0,79 durante a calibração e 0,92 na validação dos parâmetros. Esses altos coeficientes indicam uma boa capacidade do modelo em reproduzir as vazões observadas, refletindo um ajuste preciso tanto nas fases de calibração quanto de validação. A performance na validação, em particular, sugere que o modelo se ajusta bem aos dados observados e possui uma estrutura sólida para previsão de novos dados.

Quando analisado o RSR, que é a razão entre o RMSE e o desvio padrão das observações, foram encontrados valores de 0,46 durante a calibração e de 0,28 durante a validação. Esses valores indicam um desempenho satisfatório do modelo. O RSR, sendo menor que 1, sugere que o modelo tem uma boa capacidade de previsão, com o valor mais baixo durante a validação indicando uma melhor correspondência entre as previsões do modelo e os dados observacionais.

De forma geral, os resultados mostram que o modelo hidrológico foi eficiente tanto na calibração quanto na validação. Porém, é evidente o bom desempenho do CAWM na validação que demonstrou um desempenho superior, indicando previsões mais consistentes com a variabilidade dos dados.

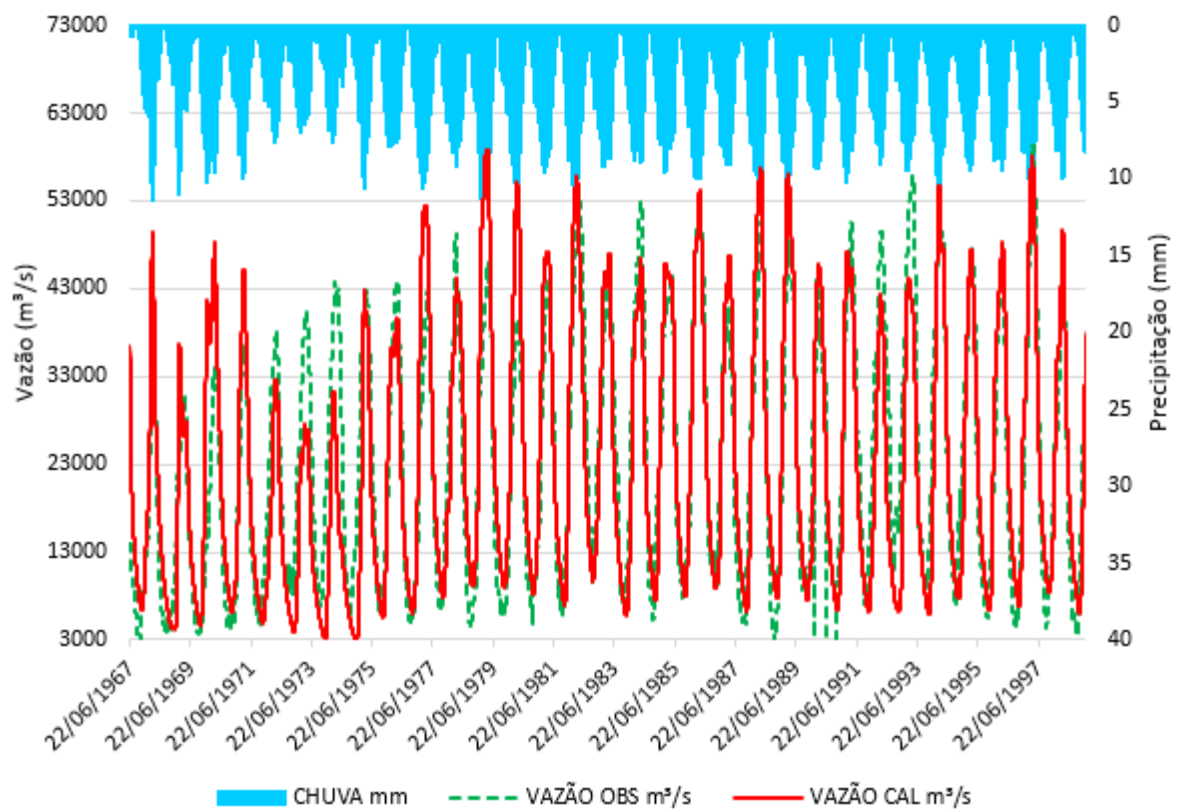
Tabela 3 - Métricas de desempenho da bacia do Rio Madeira		
MADEIRA (1570000)	CALIBRAÇÃO	VALIDAÇÃO
Período completo: Data inicial	22/06/1967	16/01/1999
Período completo: Data final	15/01/1999	31/01/2020
Vazão média observada (m ³ /s)	23305,24	23981,07
Vazão média calculada (m ³ /s)	23341,81	23621,42
Coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe - NSE	0,79	0,92
NSE considerando a raiz quadrada dos valores - NSEsqrt	0,75	0,90
NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog	0,35	0,85
Percentual de tendência - Pbias	0,16	-1,50
Raiz do erro médio quadrático - RMSE	6637,79	4396,65
Erro médio absoluto - MAE	5045,43	3484,97
Razão entre o RMSE e o desvio padrão - RSR	0,46	0,28
Coeficiente de determinação - R ²	0,81	0,92

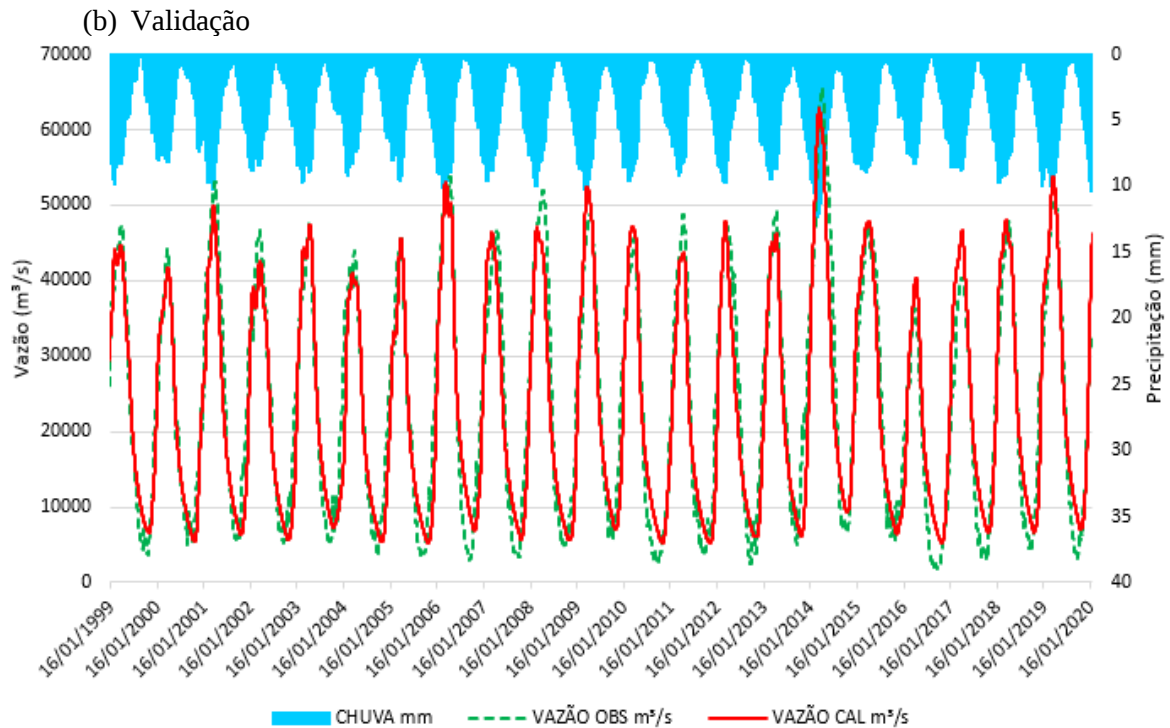
Fonte: O Autor (2024).

A Figura 19 tem-se o hidrograma das vazões calculadas e observadas com base em dados diários. A análise dos dados revela uma correlação direta entre os volumes de

precipitação registrados e os picos de vazão observados. Por exemplo, no ano de 2014, que registrou o maior pico de precipitação, também se observou um pico significativo na vazão observada (65.342 m³/s). Este padrão reforça a relação direta entre a magnitude das precipitações e a intensidade dos picos de vazão. De maneira similar, períodos de estiagem também são refletidos em baixos níveis de vazão, evidenciando que menores volumes de precipitação estão associados a menores picos de vazão.

Figura 19 - Hidrogramas de Calibração (a) e Validação (b) da bacia do Rio Madeira
(a) Calibração





Fonte: O Autor (2024).

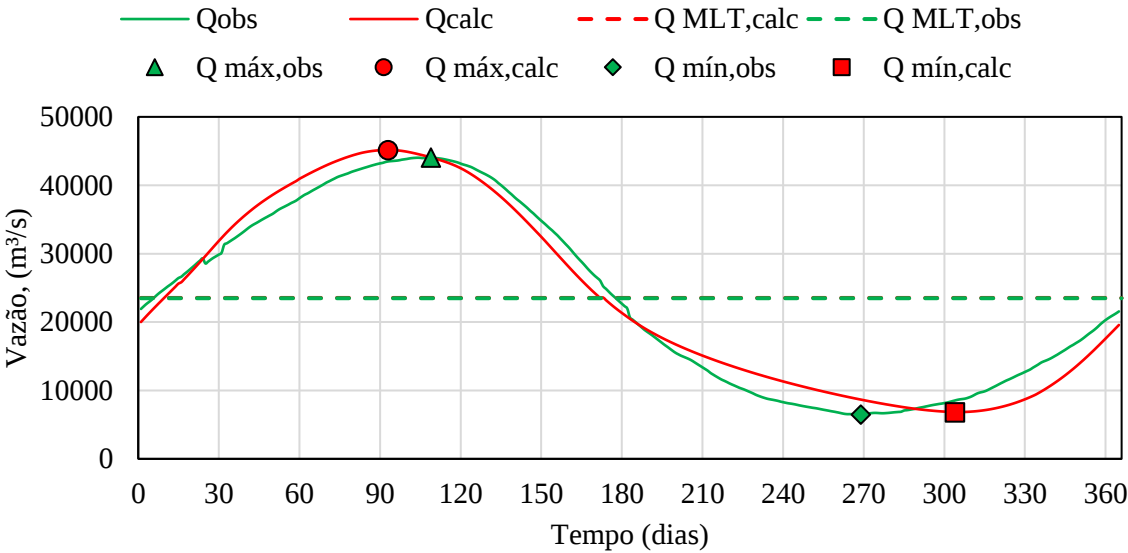
A Figura 20 observa-se o comportamento das vazões médias ao longo dos dias julianos para a bacia do Madeira. Observa-se que o pico da vazão máxima calculada ocorre no 93º dia do ano juliano, com um valor de $45.166 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto a vazão observada atinge seu pico no 109º dia, com um valor de $44.079 \text{ m}^3/\text{s}$. Essa proximidade dos picos indica que o modelo CAWM é bastante eficaz na captura das variações sazonais das vazões.

Ainda na Figura 20 é possível identificar as médias das vazões durante o ano, sendo $20.007 \text{ m}^3/\text{s}$ para a vazão calculada e $23.485 \text{ m}^3/\text{s}$ para vazão observada. Esse resultado mostrado na figura abaixo, corrobora o estudo de Gomes *et al.* (2019), que analisa a variabilidade espaço-temporal da precipitação do rio Madeira. Onde é evidenciado que o trimestre mais chuvoso ocorre em janeiro ($300,6 \text{ mm}$), fevereiro ($291,8 \text{ mm}$) e março ($286,8 \text{ mm}$), enquanto o trimestre mais seco corresponde a junho ($47,0 \text{ mm}$), julho ($29,4 \text{ mm}$) e agosto ($36,7 \text{ mm}$). A compreensão da variabilidade espaço-temporal da precipitação em bacias hidrográficas é crucial para a caracterização climática e para a identificação de potenciais riscos ambientais associados às mudanças na disponibilidade de água.

Quando avaliado o comportamento entre os dados observados e as previsões do modelo, o desempenho do modelo é considerado satisfatório, dado que as séries temporais de vazões calculadas estão bem alinhadas com as vazões observadas. Esta proximidade entre as séries temporais indica que o modelo é eficaz em reproduzir os padrões sazonais e de magnitude das

vazões, refletindo a capacidade do CAWM em capturar as dinâmicas hidrológicas da bacia do Madeira.

Figura 20 - Vazão média no período validação da bacia do Rio Madeira



Fonte: O Autor (2024).

6.1.3 Calibração e validação da bacia do rio Solimões

Para a calibração e validação da sub-bacia do rio Solimões, quanto às métricas de desempenho, como mostrado na Tabela 4, os coeficientes de NSE são classificados como bom desempenho, com valores de 0,59 na calibração e 0,81 na validação dos parâmetros. Esses valores refletem um bom ajuste do modelo às observações, com uma melhora significativa na fase de validação. A elevação do coeficiente de NSE durante a validação demonstra a eficácia do modelo em representar as variabilidades das vazões na sub-bacia e indica que ele possui uma robustez considerável para previsões de eventos.

Como complemento à análise do NSE na modelagem hidrológica, o PBIAS é útil para identificar e quantificar qualquer viés sistemático presente. Juntas, essas métricas fornecem uma avaliação mais detalhada e equilibrada do desempenho do modelo. O PBIAS reflete a discrepância entre as séries observadas e as vazões calculadas na bacia do Rio Solimões. Para este estudo, os valores de PBIAS foram de -0,73 na calibração e 0,51 na validação. O valor negativo na calibração indica uma leve superestimação das vazões calculadas em relação às observações.

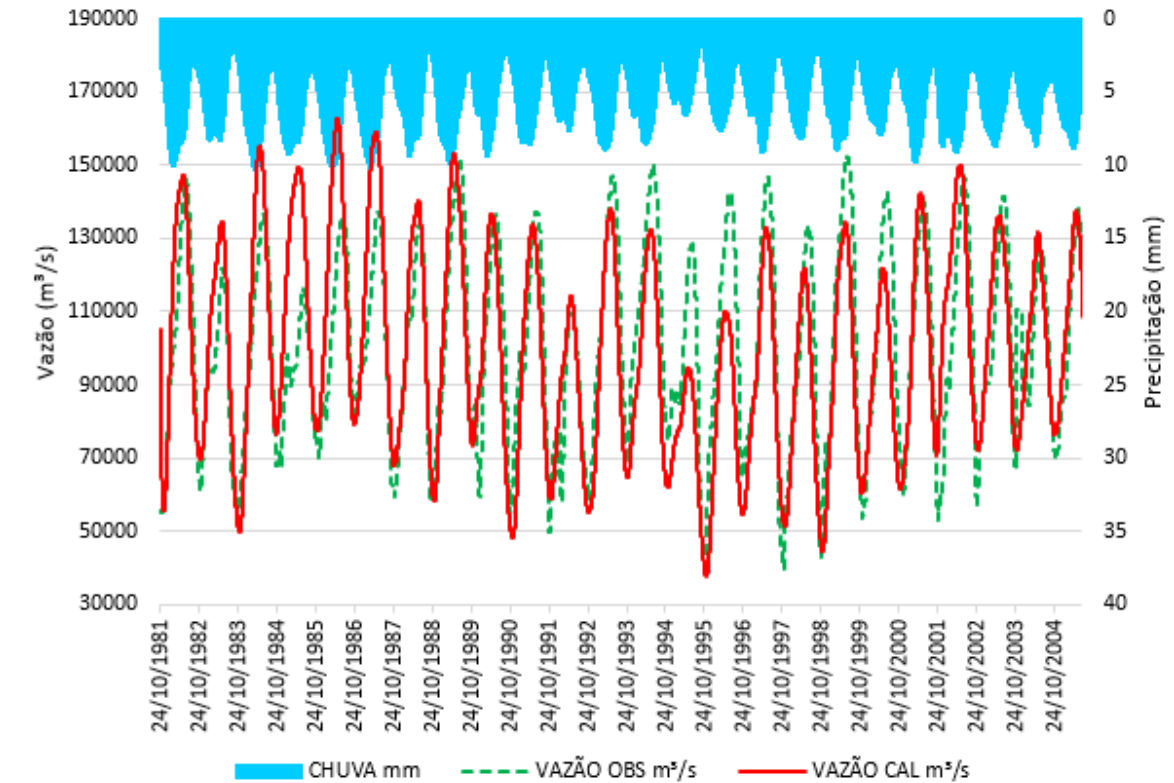
Tabela 4 - Métricas de desempenho da bacia do Rio Solimões

SOLIMÕES (1410000)	CALIBRAÇÃO	VALIDAÇÃO
Período completo: Data inicial	24/10/1981	12/07/2005
Período completo: Data final	11/07/2005	30/04/2021
Vazão média observada (m³/s)	100781,08	104190,45
Vazão média calculada (m³/s)	100050,32	104723,37
Coefficiente de eficiência Nash-Sutcliffe - NSE	0,59	0,81
NSE considerando a raiz quadrada dos valores - NSEsqr	0,62	0,82
NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog	0,64	0,83
Percentual de tendência - Pbias	-0,73	0,51
Raiz do erro médio quadrático - RMSE	17195,05	13558,55
Erro médio absoluto - MAE	13452,21	11064,62
Razão entre o RMSE e o desvio padrão - RSR	0,64	0,43
Coefficiente de determinação - R²	0,66	0,82

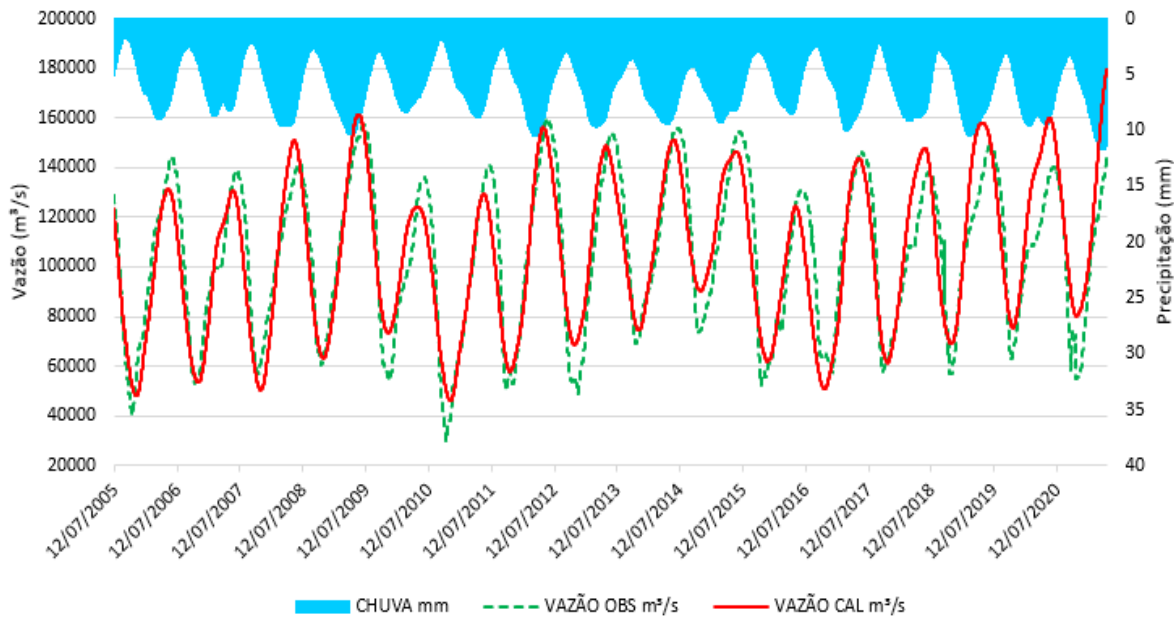
Fonte: O Autor (2024).

A Figura 21 tem-se o hidrograma das vazões calculadas e observadas, com base em dados diários. A análise dos picos de vazão e dos tempos de resposta permite avaliar o impacto imediato e prolongado das precipitações na bacia hidrográfica do Rio Solimões, além de fornecer uma visão sobre a capacidade do sistema em regular essas variações. Por exemplo, observa-se um período de estiagem em 2010, que coincide com uma redução significativa na vazão observada, diminuindo para cerca de 29.908 m³/s durante esse intervalo. No entanto, ao analisar o período supracitado, verifica-se que a vazão calculada pelo modelo não consegue capturar o pico de baixa vazão observada. Esse problema pode estar associado às inconsistências em alguns dados de precipitação coletados, que incluíam registros incorretos, como a soma total do índice pluviométrico mensal no último dia de cada mês. Apesar das correções realizadas, essas falhas nos dados podem ter afetado a capacidade do modelo de representar adequadamente as vazões extremas.

Figura 21 - Hidrogramas de Calibração (a) e Validação (b) da bacia do Rio Solimões
(a) Calibração



(b) Validação

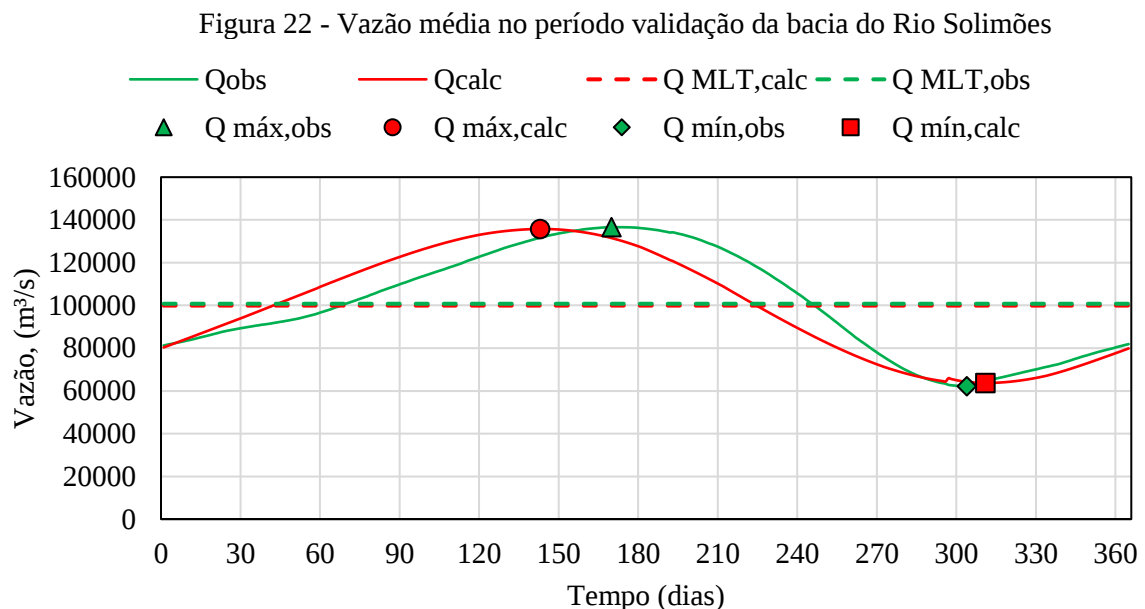


Fonte: O Autor (2024).

Ao analisar a Figura 22, observa-se o comportamento dos hidrogramas representando os dados observados e calculados. A comparação entre os dados reais e as previsões do modelo revela um desempenho satisfatório, corroborando com as métricas de desempenho previamente

apresentadas. Adicionalmente, a análise das médias das vazões mostra resultados muito próximos, entre a vazão média observada de 100.780 m³/s e a vazão média calculada de 99.915 m³/s. Essa proximidade é tão estreita que torna difícil distinguir a linha vermelha, que representa a média da vazão calculada, devido à sobreposição das duas linhas.

Segundo Neves (2017), as sub-bacias hidrográficas do Rio Solimões são particularmente significativas dentro das sub-bacias da Amazônia Legal, pois contribuem de maneira substancial para o fluxo do Rio Amazonas, apresentando uma descarga média de aproximadamente 100.000 m³/s. As simulações requereram um “lagtime” elevado, sendo no caso considerado igual ao da bacia principal (90 dias). Ainda assim, observa-se nos hidrogramas uma antecipação dos picos de vazão simuladas em relação aos valores observados no posto fluviométrico.



Fonte: O Autor (2024).

6.1.4 Calibração e validação para a bacia do Rio Negro

A estação fluviométrica de Serrinha, que está sendo usada no presente estudo, é a que possui a série de descargas mais próxima da confluência no Rio Negro, devido aos desafios impostos pelos efeitos de remanso. Esses efeitos afetam significativamente a hidrodinâmica do Rio Negro, estendendo sua influência desde a confluência com o Rio Solimões até centenas de quilômetros a montante (Meade *et al.*, 1991).

Examinando a Tabela 5, observa-se que os valores de NSE obtidos foram 0,78 (calibração) e 0,74 (validação). Segundo Moriasi *et al.* (2007), esses resultados indicam uma

eficiência classificada como boa, além disso, as proximidades desses valores entre calibração e validação sugere que o modelo tem uma robusta capacidade na modelagem da área analisada e pode ser considerado confiável para aplicações práticas.

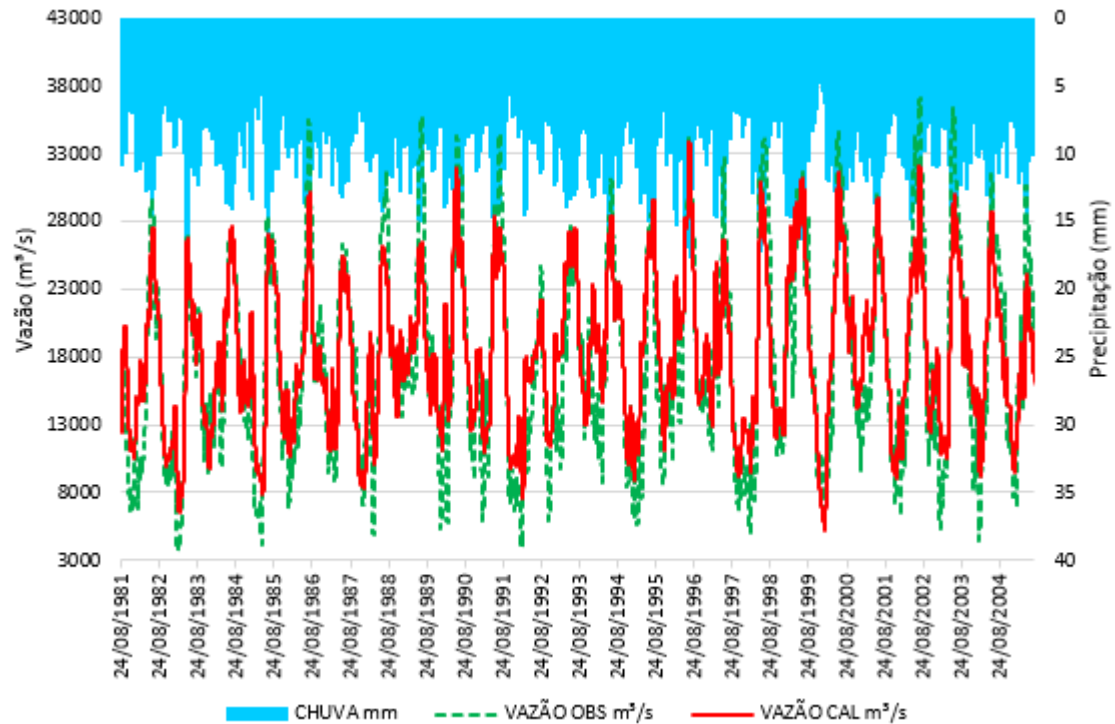
Na modelagem hidrológica da bacia do Rio Negro, a análise do PBIAS revelou valores de 3,45 na calibração e 3,25 na validação. Esses valores indicam uma leve tendência do modelo para subestimar as vazões em comparação com os dados observados. Além disso, a análise contínua do PBIAS permite ajustes finos no modelo.

Tabela 5 - Métricas de desempenho da bacia do Rio Negro		
NEGRO (1442000)	CALIBRAÇÃO	VALIDAÇÃO
Período completo: Data inicial	24/08/1981	24/07/2005
Período completo: Data final	23/07/2005	30/06/2021
Vazão média observada (m ³ /s)	17609,75	18733,49
Vazão média calculada (m ³ /s)	18217,02	19342,24
Coefficiente de eficiência Nash-Sutcliffe - NSE	0,78	0,74
NSE considerando a raiz quadrada dos valores - NSEsqrt	0,75	0,71
NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog	0,72	0,66
Percentual de tendência - Pbias	3,45	3,25
Raiz do erro médio quadrático - RMSE	3474,85	3735,14
Erro médio absoluto - MAE	2735,38	3015,70
Razão entre o RMSE e o desvio padrão - RSR	0,47	0,51
Coefficiente de determinação - R ²	0,80	0,76

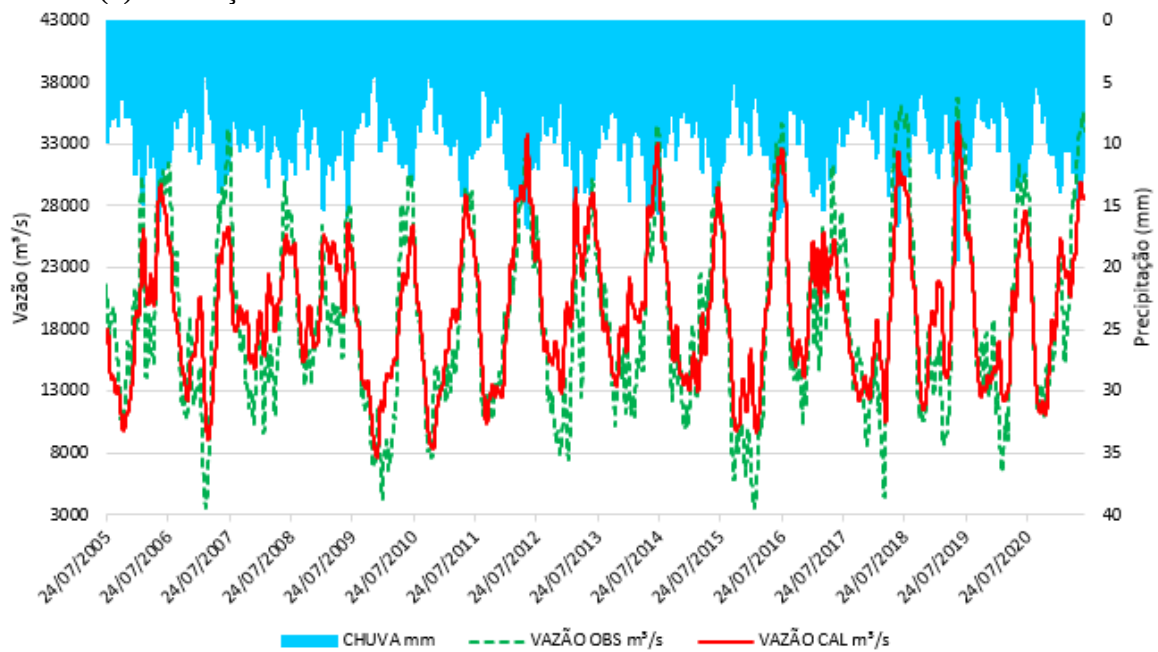
Fonte: O Autor (2024).

A Figura 23 mostra o hidrograma comparando as vazões calculadas com as observadas, com base em dados diários. Observa-se que as vazões calculadas enfrentaram dificuldades em representar adequadamente tanto as vazões altas quanto as baixas, apesar dos valores de NSE para a validação, que foram 0,71 para o NSEsqrt e 0,66 para o NSElog. Esses valores indicam um desempenho relativamente bom em termos de ajuste geral, mas ainda não refletem completamente as variações extremas. Dessa forma, essa discrepância sugere que, embora a modelagem tenha mostrado um ajuste razoável nas condições normais, são necessários ajustes nos dados de entrada ou mesmo ou a inserção de fatores adicionais para melhorar a precisão no processo de calibração e validação para aperfeiçoar a representação das extremas condições de vazão.

Figura 23 - Hidrogramas de Calibração (a) e Validação (b) da bacia do Rio Negro
(a) Calibração



(b) Validação

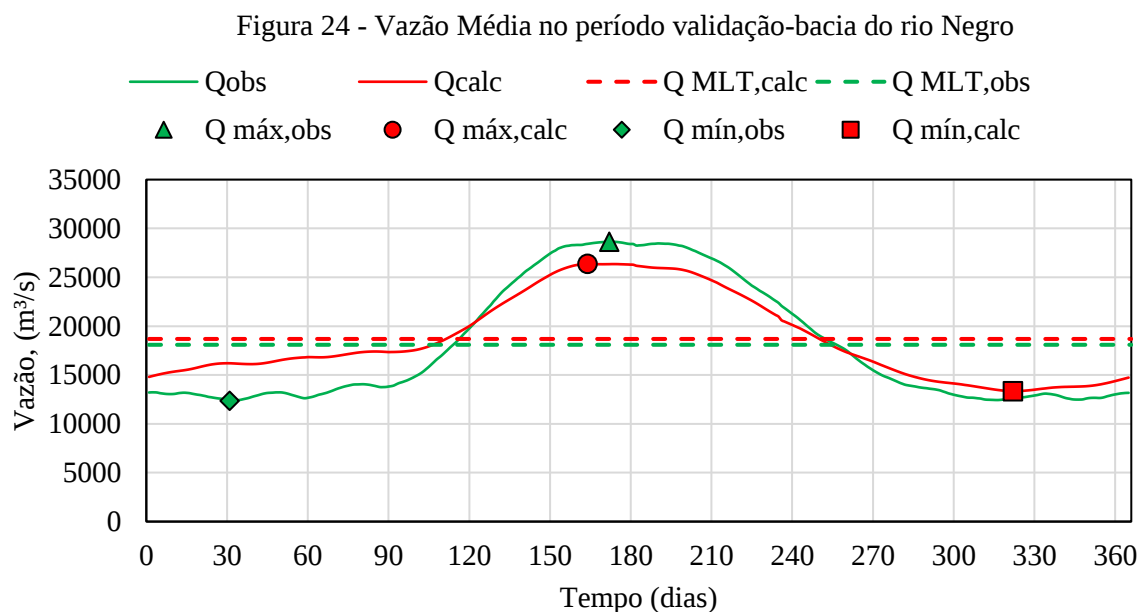


Fonte: O Autor (2024).

Analisando a Figura 24, observa-se que os picos de vazão, tanto os observados quanto os calculados, ocorrem em dias próximos, especificamente no 172º dia do ano juliano com uma vazão de 28.647 m³/s e no 164º dia com uma vazão de 26.364 m³/s. O gráfico também ilustra uma leve discrepância na qualidade dos ajustes quando comparados com as demais bacias.

Embora essa discrepância seja considerada baixa, é importante ressaltar que pode ser atribuída a diversos fatores, incluindo possíveis imprecisões nos dados meteorológicos.

Imprecisões foram identificadas nos dados de chuva após a coleta no *HidroWeb*, exigindo uma análise crítica dos postos. Alguns apresentavam problemas, como registros incorretos no último dia do mês, onde o dado refletia a soma total do índice pluviométrico mensal. Outros postos, embora listados no inventário, não apresentavam dados disponíveis, com erros predominantes na extensão fora do território brasileiro. Após a identificação dos problemas os erros foram ajustados, conforme sua magnitude, onde em alguns casos as falhas foram corrigidas, enquanto em outros, os postos afetados foram excluídos do conjunto de dados utilizado. Vale ressaltar que essa problemática foi observada nas bacias dos rios Negro, Solimões e Madeira. A mesma análise e correções foram aplicadas em todas, porém, devido às diferenças nas extensões das bacias, volumes de dados e intensidades pluviométricas, os resultados variaram em sucesso.



Fonte: O Autor (2024).

6.1.5 Calibração e validação para a bacia do Rio Xingu

Para a simulação da bacia do Rio Xingu, foram utilizados dados históricos de 1975 a 2014, alocando 60% dos dados para calibração e 40% para validação. Moriasi *et al.* (2007), considera que um valor de NSE entre 0,54 e 0,64 é adequado, e Rocha *et al.* (2012) confirmam que valores acima de 0,5 são aceitáveis. Com base nesses critérios, as simulações realizadas com o CAWM apresentaram resultados positivos para o coeficiente de NSE, com valores de

0,82 na calibração e 0,78 na validação, refletindo uma boa adequação do modelo, conforme Tabela 6. Além disso, os ajustes foram eficazes para representar tanto vazões baixas quanto altas, conforme evidenciado pelos parâmetros adicionais NSEsqr e NSElog. O NSEsqr, que representa os picos de vazões altas registrou valores de 0,85 na calibração e 0,81 na validação. Enquanto o NSElog que representa as vazões baixas do estudo, obteve valores de 0,86 e 0,84, respectivamente. Esses resultados indicam que o modelo CAWM reproduziu bem as vazões de forma geral, e que também foi eficiente em capturar as vazões nos seus máximos e mínimos.

Apesar disso, o parâmetro PBIAS foi analisado para avaliar o viés sistemático no modelo. Os valores de PBIAS obtidos foram 14,55% após a calibração e 13,36% após a validação. Esses valores sugerem um viés considerável, indicando que, isoladamente, o desempenho do modelo não foi ótimo. No entanto, para uma avaliação mais completa, é necessário considerar também o NSE, que nesse estudo indicou um desempenho bom em termos de ajuste do modelo. Dessa forma, o desempenho do CAWM no geral é aceitável e deve ser considerado no contexto da sua capacidade de prever e se ajustar aos dados observados.

Tabela 6 - Métricas de desempenho da bacia do Rio Xingu		
XINGU (1885000)	CALIBRAÇÃO	VALIDAÇÃO
Período completo: Data inicial	25/11/1975	01/01/2004
Período completo: Data final	29/11/1999	31/12/2014
Vazão média observada (m³/s)	8122,63	8479,07
Vazão média calculada (m³/s)	9304,43	9611,98
Coefficiente de eficiência Nash-Sutcliffe - NSE	0,82	0,78
NSE considerando a raiz quadrada dos valores - NSEsqr	0,85	0,81
NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog	0,86	0,84
Percentual de tendência - Pbias	14,55	13,36
Raiz do erro médio quadrático - RMSE	3132,30	3746,83
Erro médio absoluto - MAE	2204,13	2355,25
Razão entre o RMSE e o desvio padrão - RSR	0,42	0,47
Coefficiente de determinação - R²	0,85	0,80

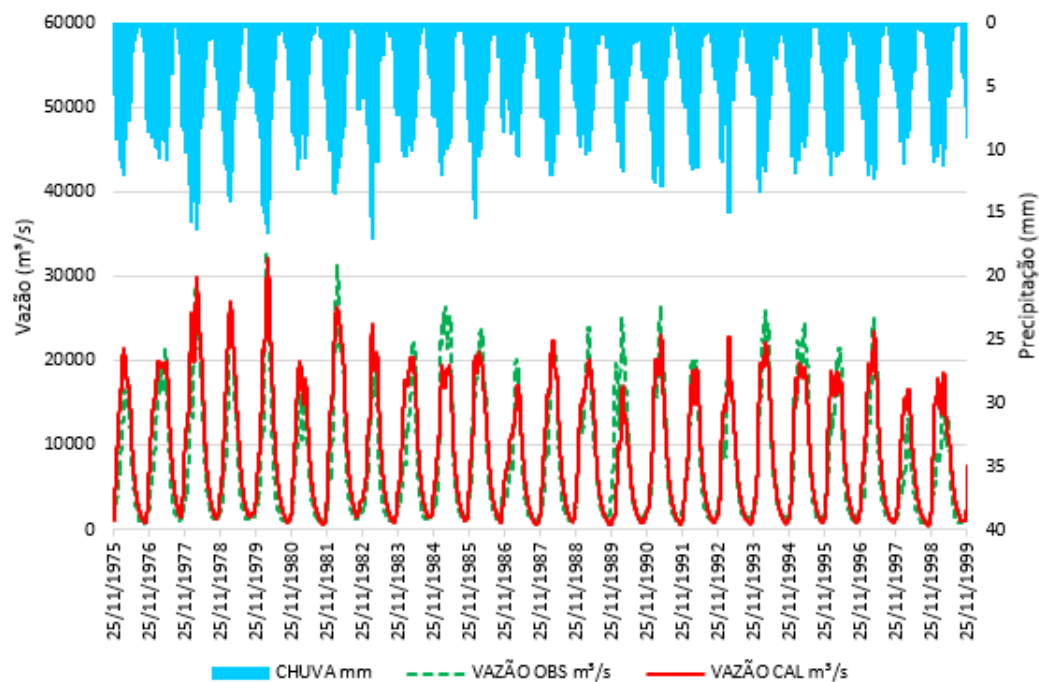
Fonte: O Autor (2024).

As semelhanças entre o hidrograma de chuva e vazão são evidentes na forma como ambos refletem a dinâmica do ciclo hidrológico, eventos de alta intensidade de precipitação frequentemente se correlacionam com picos de vazão, indicando a resposta do sistema hidrológico às chuvas. A Figura 25 permite uma análise detalhada da correlação direta entre os picos de vazão e os volumes de precipitação, especialmente ao observar o pico de precipitação

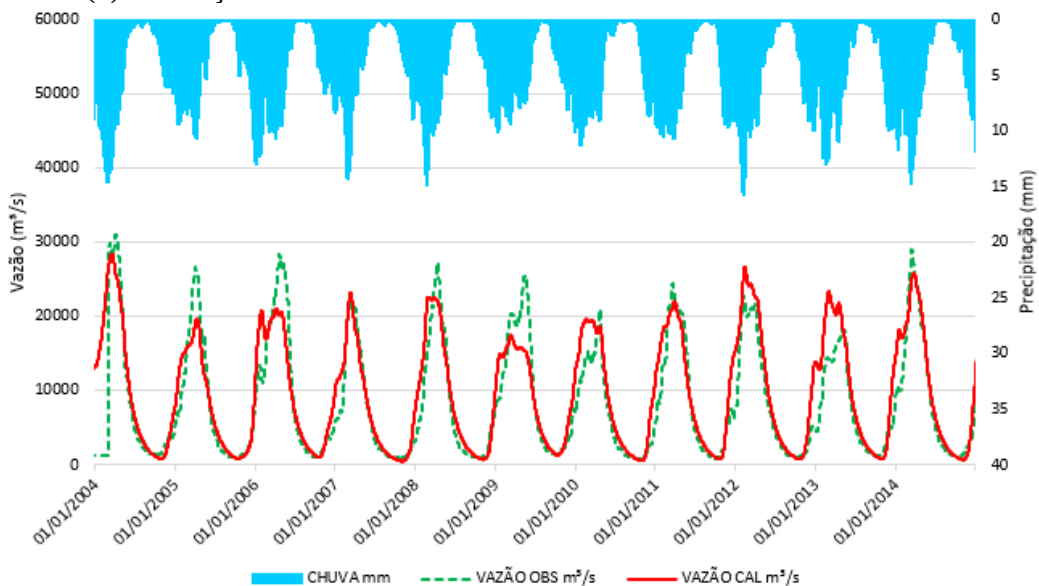
no ano de 1979. Nesse ano, coincide com um valor significativo de vazão, com valores superiores a $30.000 \text{ m}^3/\text{s}$, tanto para vazões calculadas, como também, para vazões observadas.

Ao analisarmos os extremos das vazões, tanto os máximos quanto os mínimos, é notório que o modelo não apenas reproduziu bem as condições de vazão típicas, mas também foi eficaz em representar as condições extremas. Isso é confirmado pelos valores do NSEsqrt com 0,81 e do NSElog com 0,84 na validação, demonstrando sua capacidade de ajustar-se às variações significativas no comportamento das vazões.

Figura 25 - Hidrogramas de Calibração (a) e Validação (b) da bacia do Rio Xingu
(a) Calibração



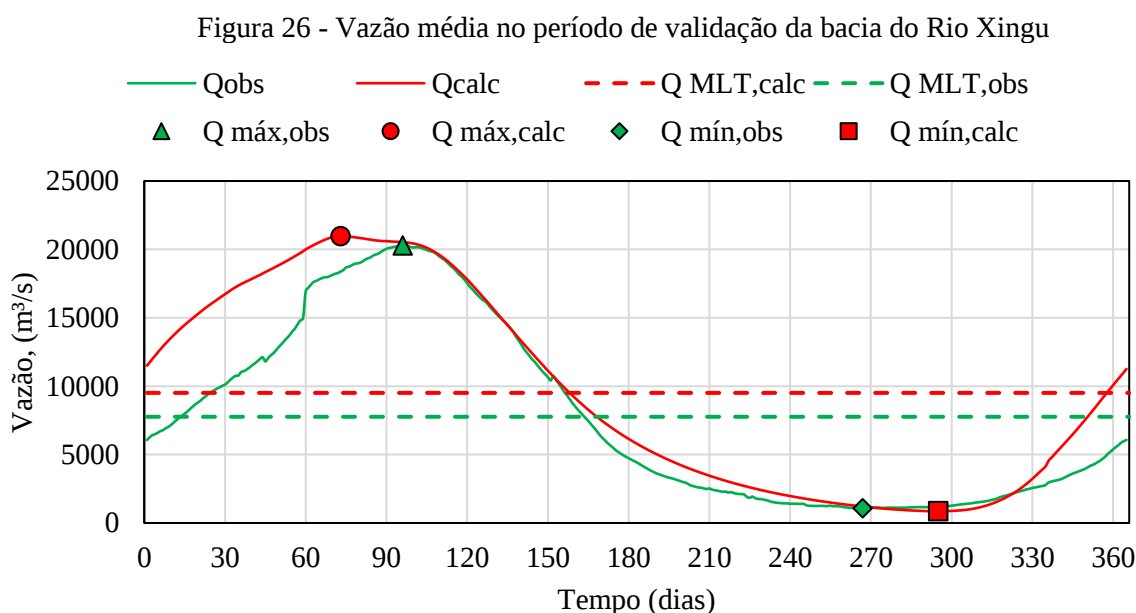
(b) Validação



Fonte: O Autor (2024).

Lucas *et al.* (2006) investigaram a regionalização e a distribuição espacial e temporal da precipitação na bacia hidrográfica do Xingu e constataram que os volumes de precipitação variam aproximadamente entre 1.500 e 2.500 mm por ano. Os autores observaram que as maiores magnitudes de chuva ocorrem nas regiões norte e sudoeste da bacia. Esses altos índices de precipitação são predominantemente atribuídos à influência dos sistemas atmosféricos, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

Na Figura 26, os picos de vazão tanto para os valores calculados quanto observados ocorrem nos dias 73 e 96 do ano juliano, respectivamente. A vazão calculada atinge a magnitude de 20.977 m³/s, enquanto a vazão observada é de 20.291 m³/s. Esse alinhamento próximo das datas e valores indica uma boa correspondência entre as previsões do modelo e os dados reais. Além disso, esses picos refletem o impacto dos eventos de precipitação na bacia do Xingu, evidenciando a capacidade do CAWM em reproduzir de maneira eficaz as variações sazonais da vazão. No entanto, deve-se registrar que o modelo superestimou as vazões nos primeiros três meses do ano Juliano.



Fonte: O Autor (2024).

6.1.6 Calibração e validação para bacia do Rio Tapajós

No presente estudo, conforme evidenciado na Tabela 7, a média da vazão observada foi de 9.064 m³/s durante a calibração e de 10.673 m³/s durante a validação. Em comparação, a média da vazão calculada apresentou valores de 9.774 m³/s na calibração e de 10.687 m³/s na

validação. A partir dessa análise, embora a vazão calculada esteja consistentemente acima da vazão observada, o modelo apresenta uma capacidade boa de prever as vazões. Araújo, Lima e Santos (2015) realizaram uma análise pluviométrica na bacia do Médio Tapajós, que constitui uma parte da bacia do Tapajós no estudo atual. Esta análise foi limitada exclusivamente ao estado do Pará, representando 38% da extensão total da bacia. A pesquisa revelou que as médias anuais acumuladas de precipitação variaram entre 1937 mm e 2510 mm. Além disso, a média anual de vazão foi de 12.259 m³/s. Os dados também indicaram que a vazão atinge seu valor máximo em abril, com 34.233 m³/s, e seu valor mínimo em setembro, com 1.303 m³/s.

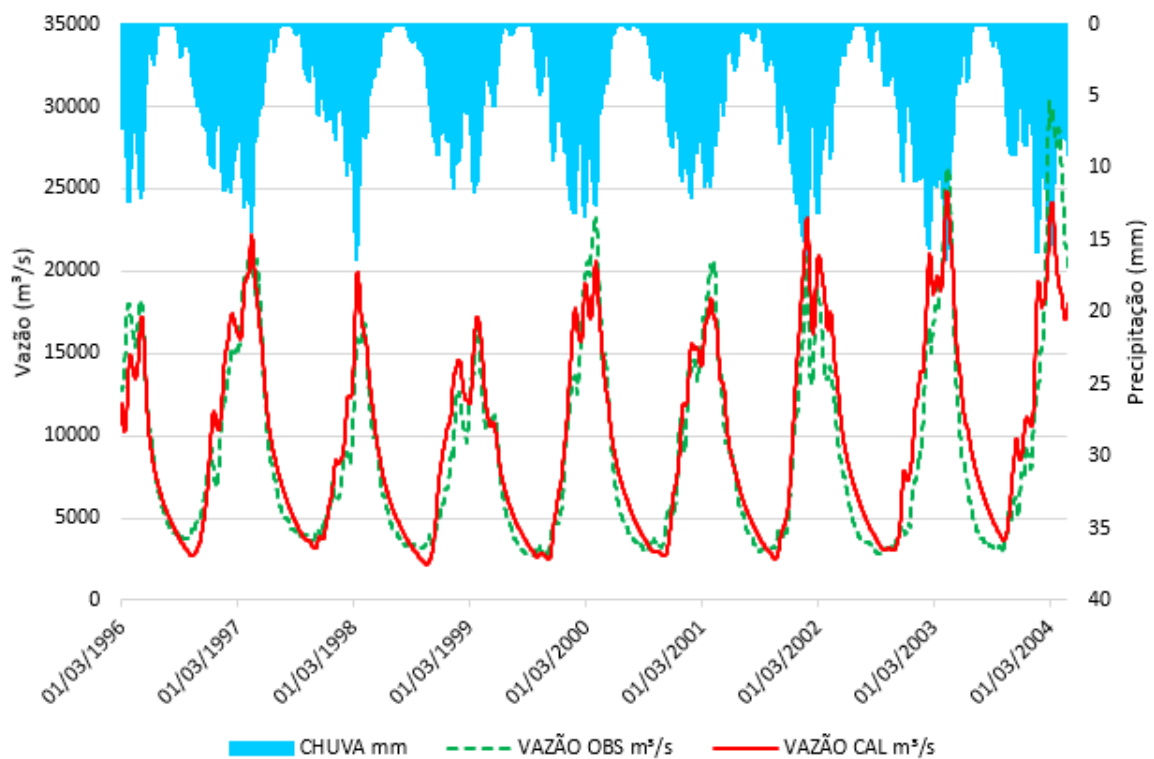
Tabela 7 - Métricas de desempenho da bacia do Rio Tapajós		
TAPAJÓS (17650002)	CALIBRAÇÃO	VALIDAÇÃO
Período completo: Data inicial	01/03/1996	26/04/2004
Período completo: Data final	25/04/2004	30/09/2009
Vazão média observada (m³/s)	9064,14	10673,28
Vazão média calculada (m³/s)	9774,28	10687,99
Coefficiente de eficiência Nash-Sutcliffe - NSE	0,88	0,91
NSE considerando a raiz quadrada dos valores - NSEsqrt	0,89	0,92
NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog	0,88	0,91
Percentual de tendência - Pbias	7,83	0,14
Raiz do erro médio quadrático - RMSE	2136,84	2122,60
Erro médio absoluto - MAE	1602,03	1625,49
Razão entre o RMSE e o desvio padrão - RSR	0,35	0,30
Coefficiente de determinação - R²	0,89	0,91

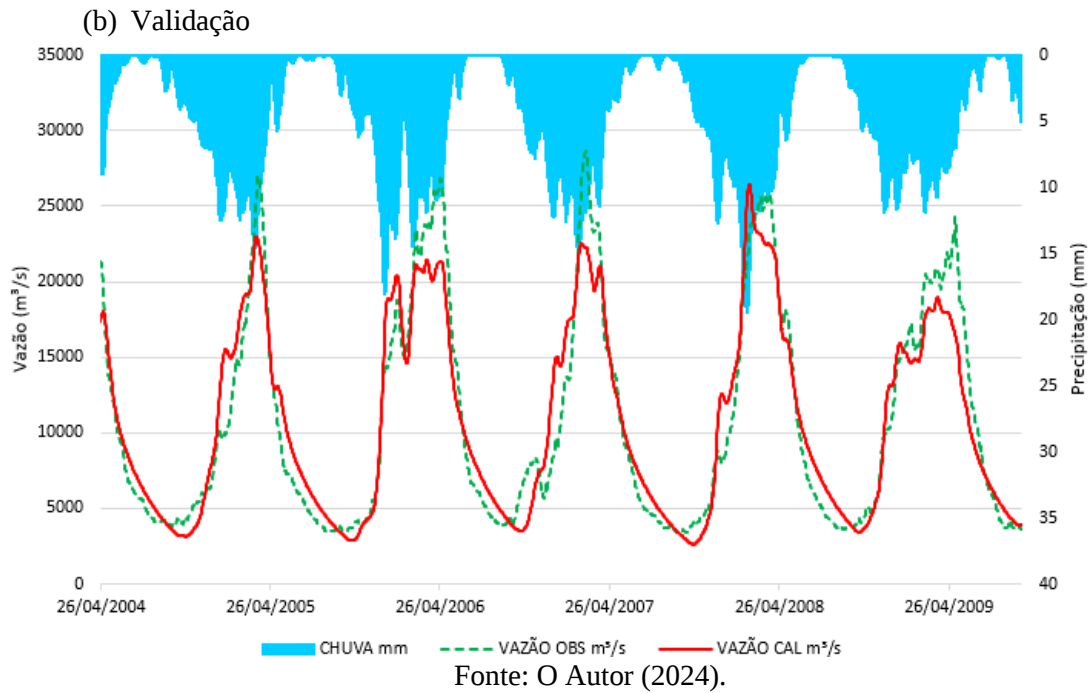
Fonte: O Autor (2024).

Em relação às métricas de desempenho apresentadas no quadro acima, o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) alcançou valores de 0,88 e 0,91 durante a calibração e validação da bacia do Rio Tapajós, respectivamente. Estes valores indicam uma excelente adequação do modelo aos dados observados, evidenciando uma alta capacidade de previsão das vazões. Adicionalmente, o índice de razão de resíduos a desvio padrão (RSR) apresentou valores de 0,35 na calibração e 0,30 na validação. Outro parâmetro de grande relevância é o coeficiente de determinação (R²), que apresentou valores de 0,89 e 0,91 durante a calibração e validação, respectivamente. Esses valores indicam uma forte correlação entre as vazões observadas e as vazões previstas pelo modelo, refletindo a capacidade do modelo em explicar uma alta proporção da variabilidade dos dados. No geral, esses resultados indicam que o CAWM apresenta um desempenho satisfatório, com uma eficaz capacidade de discriminação entre as vazões previstas e observadas.

A Figura 27 oferece uma visão detalhada da correlação direta entre os picos de vazão e os volumes de precipitação. A análise revela uma clara relação entre períodos de estiagem e a redução dos níveis de vazão. Esta correlação é particularmente evidente ao examinar o pico de precipitação no ano de 2008, que coincide com um aumento substancial na vazão calculada, que alcançou 26.200 m³/s. Esta coincidência destaca a sensibilidade do regime de vazão às variações na precipitação e sublinha a importância de considerar a precipitação como um fator chave na modelagem.

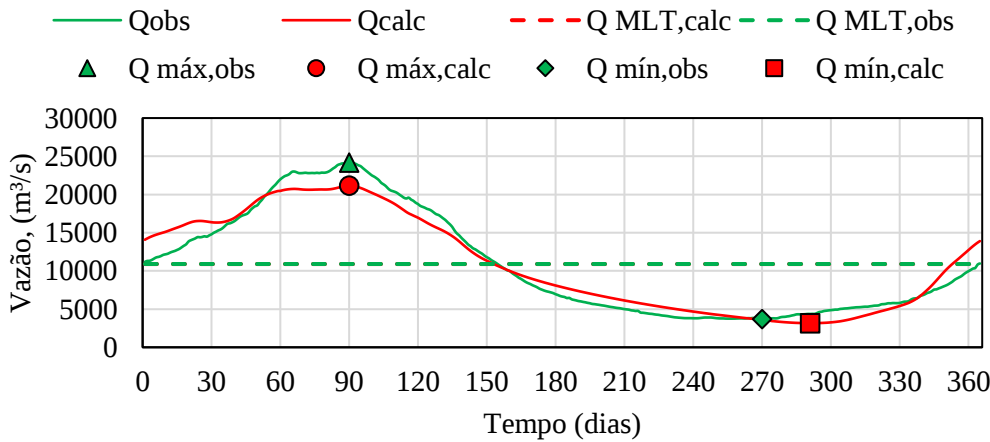
Figura 27 - Hidrogramas de Calibração (a) e Validação (b) da bacia do Rio Tapajós
(a) Calibração





A Figura 28 permite a análise detalhada da distribuição das vazões ao longo do ano juliano. Em particular, observam-se os valores das vazões máximas, que atingem 24.149 m³/s para a vazão observada no dia 90º e 21.163 m³/s para a vazão calculada no dia 90º do ano juliano. Essas observações evidenciam a proximidade dos picos de vazão entre os dados observados e os valores calculados, destacando a eficácia do modelo em replicar as variações extremas das vazões ao longo do ano.

Figura 28 - Vazão média no período validação da bacia do Rio Tapajós



Um aspecto a ser destacado na figura acima é a média das vazões observadas, representada pelas linhas tracejadas. A média da vazão observada atinge 10.903 m³/s, enquanto a média da vazão calculada é de 10.892 m³/s, há uma proximidade tão forte entre as duas variáveis que na Figura 28 só é possível observar apenas a média da vazão observada. Essa comparação entre as médias das vazões observadas e calculadas oferece uma percepção importante sobre a precisão do modelo em capturar as tendências gerais dos dados hidrológicos ao longo do ano.

6.2 TRANSFERÊNCIA DE PARÂMETROS (REGIONALIZAÇÃO)

Antes de apresentar os resultados da transferência de parâmetros de uma bacia calibrada para uma sub-bacia não calibrada no processo denominado de regionalização, é pertinente organizar e ilustrar os parâmetros utilizados nesse processo. No contexto da modelagem, esses parâmetros foram inicialmente extraídos da bacia principal do Rio Amazonas e, subsequentemente, aplicados às sub-bacias aninhadas. A análise desse processo busca fornecer uma base para compreender a eficácia e a precisão da transferência de dados entre diferentes bacias. Dessa forma, na Tabela 8 é possível identificar os parâmetros extraídos da bacia principal que serão usados na modelagem.

Como mencionado na metodologia, para chegar aos valores aqui apresentados foi necessário uma série de testes e combinações de parâmetros no processo de regionalização usando os dados apresentados na Tabela 8, da bacia calibrada usada como referência, combinados com os dados da sub-bacia não calibrada.

Tabela 8 - Parâmetros extraídos da bacia principal

AMAZONAS (1757000)	CALIBRAÇÃO
Lagtime (dias)	90
Área (km²)	4.681.554
Lâmina (mm)	54191
Nº de dias da série histórica	17350
Ks	0.0085
β	6

Fonte: O Autor (2024).

Para o primeiro teste, sendo realizado na variável "p", que é o parâmetro ajustável responsável por refletir perdas de água mais significativas quando ocorre extravasamento na calha da rede fluvial, considerando que os valores típicos para esse parâmetro decorrentes das

aplicações feitas com o CAWM por muitos autores variam entre 1,1 e 0,9 (Cirilo, 2024). Após a realização de alguns testes, determinou-se que a modelagem apresentou o melhor ajuste com o valor de 0,9. Esse ajuste permite que a modelagem reflita de maneira mais precisa as condições de extravasamento, melhorando a representatividade dos processos hidrológicos no modelo.

Em seguida, foram conduzidos testes com o parâmetro de *lagtime* para investigar como diferentes fatores influenciam o tempo de defasagem na bacia principal. Os resultados desses testes permitiram identificar que a correlação mais adequada para a modelagem foi a razão quadrática entre as áreas da sub-bacia não calibrada e a bacia principal, multiplicada pelo *lagtime* da bacia principal.

Adicionalmente, foram realizados testes para avaliar o impacto nas variáveis de coeficiente de recarga (β) e taxa de percolação no solo (K_s), na modelagem. A partir desses testes, foi determinado que o cenário mais eficaz para ser usado na regionalização é o produto dos parâmetros β e K_s , da bacia principal, ajustado pelo coeficiente angular obtido a partir dos dados do satélite ERA 5 para calcular os parâmetros da sub-bacia.

6.2.1 Regionalização da bacia do Rio Madeira

Ao examinar as métricas de desempenho apresentadas na Tabela 9, observa-se que o valor do NSE foi de 0,68. Vale destacar que, o processo de regionalização envolve a transferência de dados de uma bacia calibrada para outra não calibrada, e, neste caso, a comparação é realizada entre duas bacias de extensões significativamente grandes a bacia do Rio Amazonas e a bacia do Rio Madeira. Dessa forma, dada a extensão das bacias no estudo, um valor de NSE de 0,68 sugere uma performance notável do modelo.

Outro parâmetro relevante neste estudo é a razão entre o RMSE e o desvio padrão, conhecida como RSR, com valor obtido para o RSR de 0,57. De acordo com a escala proposta por Moriasi *et al.* (2007), esse valor é classificado como bom. A escala de Moriasi *et al.* (2007) considera valores de RSR abaixo de 0,50 como excelentes, entre 0,50 e 0,60 como bons, e valores superiores a 0,60 como aceitáveis, mas com espaço para melhorias. Portanto, o RSR de 0,57 indica que o modelo tem um desempenho adequado e confiável, sugerindo que a regionalização foi bem-sucedida em manter a precisão das previsões. Além desse, o coeficiente de determinação R^2 alcançou valores em torno de 0,81 na regionalização entre as bacias, esse valor indica uma alta correlação entre as vazões observadas e calculadas.

Tabela 9 - Métricas de desempenho da bacia do Rio Madeira

INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO	GLOBAL
Período completo: Data inicial	07/06/1967
Período completo: Data final	31/01/2020
Vazão média observada (m³/s)	23568,90
Vazão média calculada (m³/s)	29028,21
Coefficiente de eficiência Nash-Sutcliffe – NSE	0,68
NSE considerando a raiz quadrada dos valores – NSEsqr	0,57
NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog	0,27
Percentual de tendência – Pbias	23,16
Raiz do erro médio quadrático – RMSE	8485,33
Erro médio absoluto – MAE	7121,39
Razão entre o RMSE e o desvio padrão – RSR	0,57
Coefficiente de determinação - R²	0,81

Fonte: O Autor (2024).

Como explicitado os valores das métricas de desempenho, apresentadas no quadro acima, indicam um bom desempenho do CAWM, considerando a complexidade e a extensão das bacias analisadas. Isso sugere que, mesmo em um processo de regionalização desafiador e com bacias de grandes dimensões, o modelo é eficaz na representação das variações de vazão.

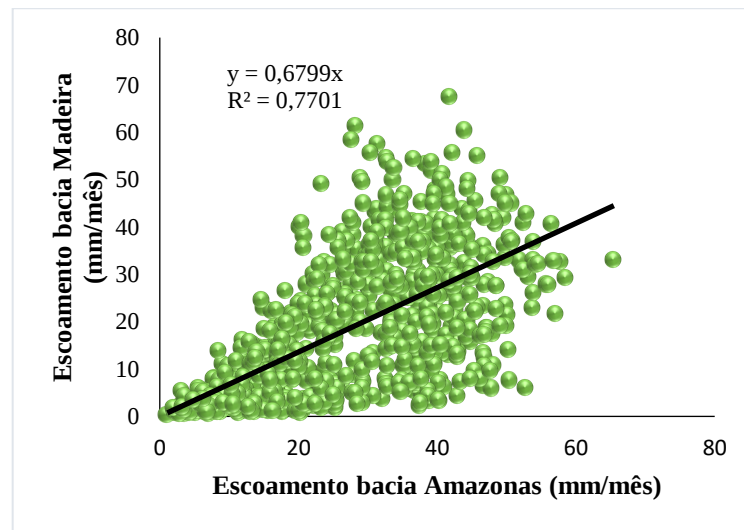
Na Figura 29, observam-se duas subfiguras distintas. A Figura 29-A ilustra a relação de escoamento entre a bacia principal e a sub-bacia em análise, com dados provenientes do ERA 5. Esta representação permite visualizar como o escoamento se comporta na bacia principal em comparação com a sub-bacia de interesse. Por outro lado, Figura 29-B apresenta a média das vazões diárias ao longo dos dias do ano juliano para a bacia do Rio Madeira, após a aplicação do processo de regionalização.

Para a Figura 29-A, é possível analisar a partir do gráfico de dispersão dos dados do escoamento extraídos do ERA 5 da bacia principal Amazonas e de cada sub-bacia, nesse caso a sub-bacia do Rio Madeira. O valor apenas mediano do coeficiente de determinação indica correlação apenas razoável. A partir dessa análise, a equação da reta ajustada ao gráfico de dispersão resultou em um coeficiente angular de 0,6799. Em termos práticos, esse valor indica a taxa de variação entre os escoamentos da bacia principal e os escoamentos da sub-bacia do Rio Madeira. É possível dizer, que a sub-bacia do Rio Madeira responde de forma menos intensa do que a bacia principal em termos de variação de escoamento. O referido valor é utilizado para estabelecer a relação entre a bacia calibrada e a bacia não calibrada, sendo aplicado diretamente no cálculo da lâmina d'água, bem como nos cálculos dos parâmetros Ks e β para a bacia não calibrada.

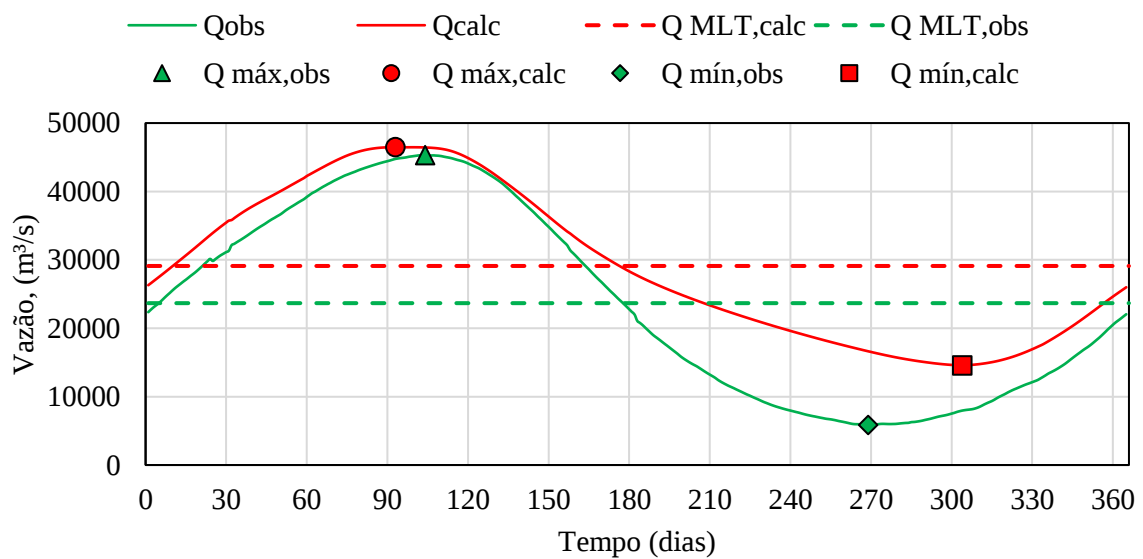
Entretanto, é importante considerar esse dado de escoamento em conjunto com outros parâmetros, como o utilizado no processo de regionalização. Já que apesar da baixa correlação entre a bacia principal e a sub-bacia evidenciada a partir do coeficiente angular, o valor de NSE foi de 0,68, o que oferece uma visão confiável da dinâmica hidrológica das bacias analisadas e demonstra uma eficiência satisfatória do modelo CAWM no processo de regionalização.

Figura 29 - (A) Relação do escoamento entre a bacia principal e a sub-bacia. (B) Vazão Média no período total para a sub-bacia do Rio Madeira

(A)



(B)



Fonte: O Autor (2024).

Na Figura 29-B, estão apresentadas as médias das vazões diárias ao longo do ano para a regionalização da bacia do rio Madeira. Observa-se que os picos de vazão ocorrem no dia 93 do ano juliano, com uma vazão calculada de 46.469 m³/s. A máxima vazão observada é registrada no dia 104 do ano juliano, com um valor de 45.325 m³/s. A diferença entre a vazão calculada e a vazão observada durante os picos é relativamente pequena, o que sugere que o CAWM se revelou bem alinhado com as observações reais especialmente para as maiores vazões. Outro dado interessante é a média das vazões durante o período de estudo, sendo 29.108 m³/s para a vazão calculada e 23.669 m³/s para a vazão observada. Essa diferença decorre principalmente das vazões médias e baixas, para as quais o modelo superestimou os valores.

6.2.2 Regionalização da bacia do Rio Solimões

Ao analisar as métricas de desempenho apresentadas na Tabela 10, é possível identificar que o modelo não respondeu bem à regionalização da bacia do rio Solimões. Esse fato pode ser evidenciado com a análise de alguns dos parâmetros, como exemplo o coeficiente de NSE que ficou na ordem de 0,41, o que indica uma eficiência insatisfatória. Apesar de o PBIAS, encontrar valor na ordem de -10.65, que mostrar que modelo tende a subestimar os escoamentos de forma sistemática e RSR ter sido igual a 0,77, que indica erro do modelo é considerável em relação à variabilidade dos dados observados, embora não seja extremamente elevado.

Tabela 10 - Métricas de desempenho da bacia do Rio Solimões

INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO	GLOBAL
Período completo: Data inicial	26/09/1981
Período completo: Data final	31/12/2011
Vazão média observada (m³/s)	100159,38
Vazão média calculada (m³/s)	89491,13
Coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe - NSE	0,41
NSE considerando a raiz quadrada dos valores - NSEsqr	0,41
NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog	0,41
Percentual de tendência - Pbias	-10,65
Raiz do erro médio quadrático - RMSE	21614,20
Erro médio absoluto - MAE	17229,51
Razão entre o RMSE e o desvio padrão - RSR	0,77
Coeficiente de determinação - R²	0,61

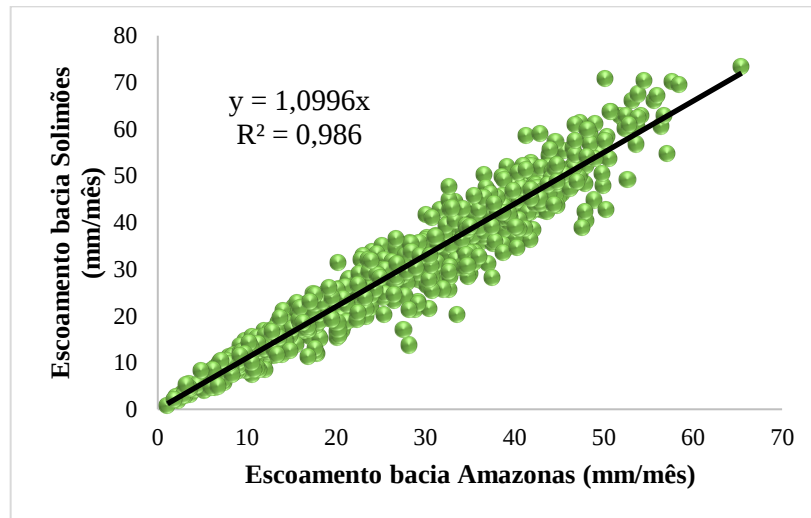
Fonte: O Autor (2024).

Ao analisar as séries obtidas do ERA 5 indicadas na Figura 30, observa-se que o coeficiente angular, derivado da equação da reta que descreve a relação entre o escoamento da bacia calibrada e a bacia não calibrada é de 1,0996 com coeficiente de determinação próximo da unidade. Esse valor sugere uma excelente correspondência e que há uma alta consistência na correlação entre os escoamentos das bacias. Porém, quando regionalizada, o modelo não conseguiu representar bem a correlação esperada.

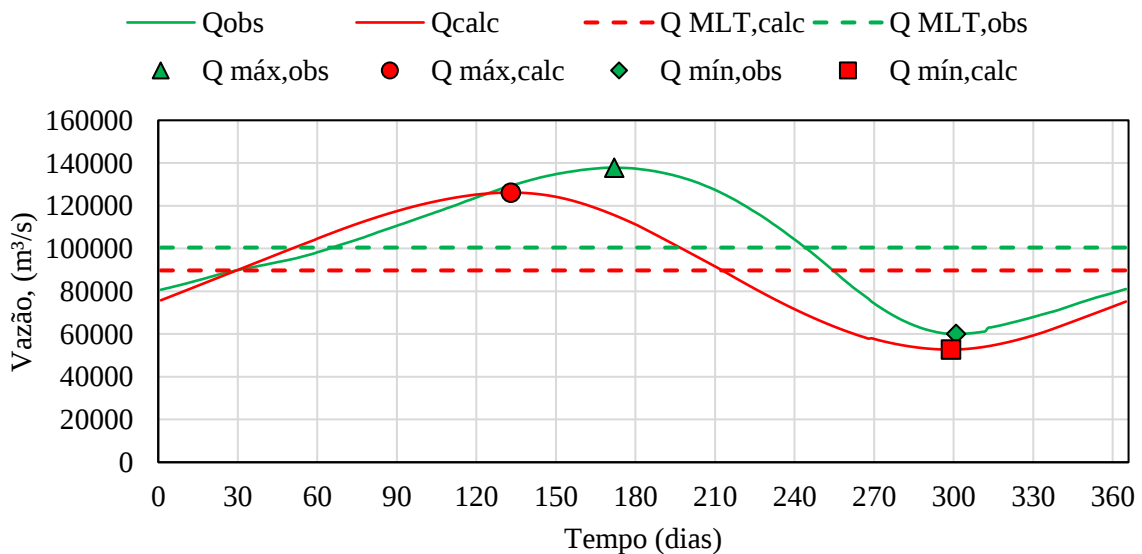
Observando o hidrograma juliano, pode-se perceber que os indicadores não satisfatórios decorrem principalmente da defasagem dos hidrogramas, como já havia ocorrido no processo de calibração/validação.

Figura 30 - (A) Relação do escoamento entre a bacia principal e a sub-bacia. (B) Vazão média no período total para a sub-bacia do rio Solimões.

(A)



(B)



Fonte: O Autor (2024).

6.2.3 Regionalização da bacia do Rio Negro

Assim como observado na bacia do Rio Solimões, a sub-bacia do Rio Negro também apresentou resultados insatisfatórios nas métricas de desempenho. Isso é evidenciado pelos valores baixos do NSE e do R^2 , que foram de 0,30 e 0,71, respectivamente, conforme Tabela 11. Esses valores indicam que o CAWM se mostrou com baixa capacidade de explicar a variabilidade dos dados observados e que o ajuste entre os dados simulados e reais é insatisfatório. O NSE de 0,30 sugere que o modelo está apenas parcialmente representando a variabilidade dos escoamentos, com um desempenho abaixo do desejável. Já o R^2 de 0,71 indica que o modelo explica pouco mais da metade da variabilidade observada, sugerindo uma correspondência fraca entre as previsões do modelo e os dados observados.

Tabela 11 - Métricas de desempenho da bacia do Rio Negro	
INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO	GLOBAL
Período completo: Data inicial	16/08/1981
Período completo: Data final	30/06/2021
Vazão média observada (m³/s)	18059,44
Vazão média calculada (m³/s)	14615,15
Coefficiente de eficiência Nash-Sutcliffe - NSE	0,30
NSE considerando a raiz quadrada dos valores - NSEsqrt	0,40
NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog	0,49
Percentual de tendência - Pbias	-19,07
Raiz do erro médio quadrático - RMSE	6141,39
Erro médio absoluto - MAE	4644,39
Razão entre o RMSE e o desvio padrão - RSR	0,83
Coefficiente de determinação - R²	0,71

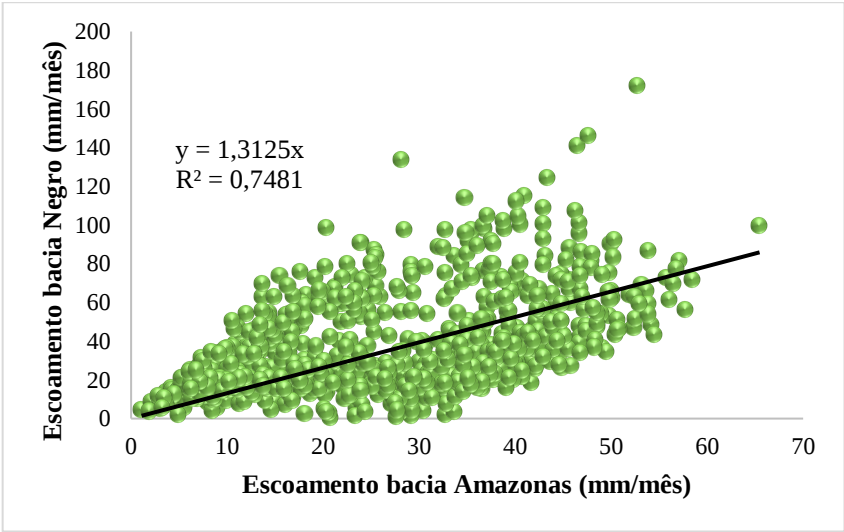
Fonte: O Autor (2024).

Ao examinar a Figura 31, destaca-se inicialmente a correlação entre os escoamentos das diferentes bacias, evidenciada pelo coeficiente angular de aproximadamente 0,7481. O baixo valor de R^2 reflete a dispersão das relações obtidas. Durante o processo de regionalização foram igualmente identificados valores baixos nas métricas de desempenho.

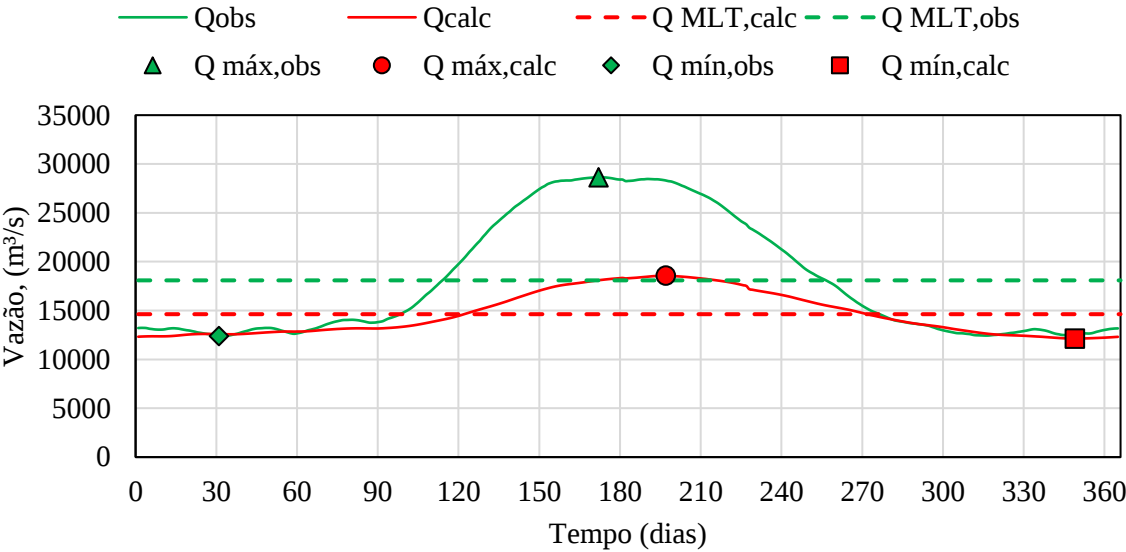
Vale ressaltar que a bacia do rio Negro possui uma parcela de área em território internacional. São fatores podem ter impactado na qualidade dos dados disponíveis, limitando a precisão das análises e consequentemente reduzindo a eficiência do modelo hidrológico.

Figura 31 - (A) Relação do escoamento entre a bacia principal e a sub-bacia. (B) Vazão média no período total para a sub bacia do Rio Negro.

(A)



(B)



Fonte: O Autor (2024).

Ao observar a Figura 31-B, a vazão máxima observada é de 28.647 m³/s, enquanto a vazão máxima calculada é de 18.564 m³/s.

6.2.4 Regionalização da bacia do Rio Xingu

A análise inicial a ser realizada em relação a regionalização da bacia do Rio Xingu com os dados da bacia calibrada do Rio Amazonas, é o comportamento das variáveis estatísticas apresentada na Tabela 12. Considerando os coeficientes de eficiência NSE, NSEsqrt e NSElog, foram registrados valores de 0,59; 0,54 e 0,44 respectivamente. O NSE de 0,59 sugere uma

performance moderada, indicando que o modelo tem uma capacidade razoável de prever os escoamentos em comparação com os dados observados.

No que diz respeito ao PBIAS com valor de 11,46 e ao R^2 com valor de 0,69. Na análise do PBIAS, o valor sendo positivo ele é um indicativo de que o modelo está subestimando as vazões. Em relação ao valor encontrado no R^2 , embora o valor não seja tão alto, sugere uma correspondência razoável entre os dados simulados e observados, com o CAWM capturando uma parte significativa da dinâmica hidrológica.

É crucial destacar a complexidade do processo de regionalização, que se intensifica quando se considera a vasta extensão das bacias analisadas. A bacia do Amazonas, com uma área de 4 milhões de km^2 , e a bacia do Rio Negro, com uma área de 4 mil km^2 , ilustram bem essa complexidade. A diversidade e a escala dessas bacias representam desafios significativos na regionalização, exigindo abordagens adaptativas e precisas para garantir a eficácia das análises hidrológicas.

Tabela 12 - Métricas de desempenho-Bacia do rio Xingu

INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO	GLOBAL
Período completo: Data inicial	12/11/1975
Período completo: Data final	01/12/2015
Vazão média observada (m^3/s)	7975,20
Vazão média calculada (m^3/s)	8888,80
Coefficiente de eficiência Nash-Sutcliffe - NSE	0,59
NSE considerando a raiz quadrada dos valores - NSEsqrt	0,54
NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog	0,44
Percentual de tendência - Pbias	11,46
Raiz do erro médio quadrático - RMSE	4828,42
Erro médio absoluto - MAE	4049,55
Razão entre o RMSE e o desvio padrão - RSR	0,64
Coefficiente de determinação - R^2	0,69

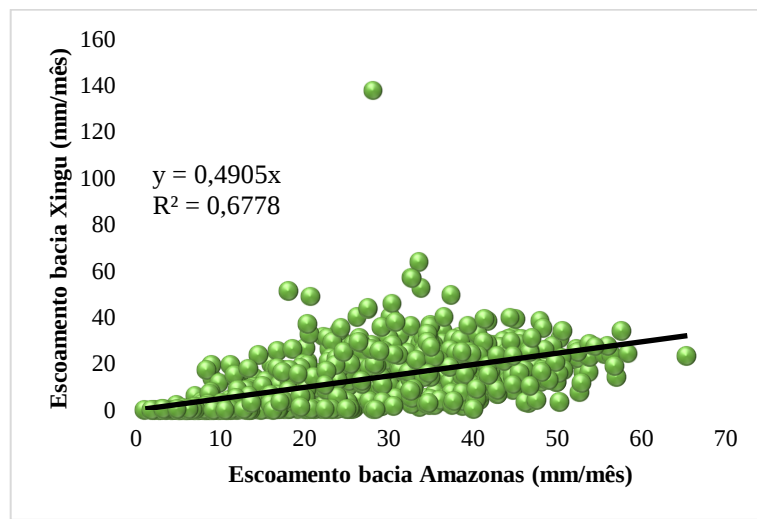
Fonte: O Autor (2024).

Em relação aos dados apresentados na Figura 32, é possível analisar a correlação entre os escoamentos da bacia do Amazonas (bacia calibrada) e a bacia do Xingu (bacia a ser calibrada). O coeficiente angular, obtido da equação da reta no gráfico de dispersão, é de 0,4905. Esse valor sugere uma correlação relativamente baixa entre as variáveis estudadas, indicando que a bacia do Xingu tem uma relação fraca com a bacia do Amazonas em termos de escoamento.

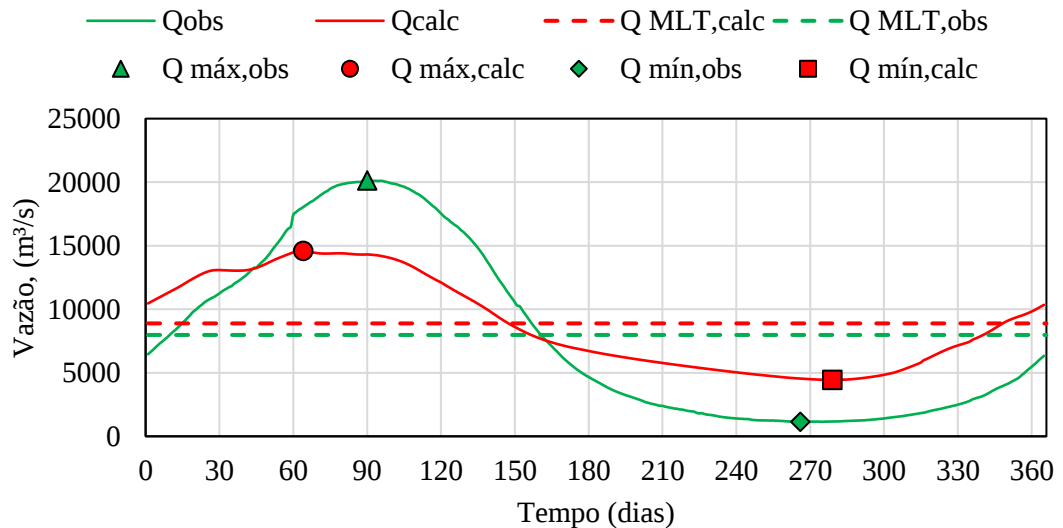
No entanto, ao confrontar esses dados com o coeficiente de eficiência NSE de 0,59, pode-se inferir que, enquanto o coeficiente angular indica uma correlação baixa, o NSE sugere um desempenho moderado do CAWM na previsão de vazões. O NSE de 0,59 indica que o modelo é capaz de explicar uma parte considerável da variabilidade observada, capturando uma parte significativa da dinâmica dos escoamentos. Dessa forma, pode-se extrair que o CAWM teve um desempenho razoável em termos de previsão global dos escoamentos.

Figura 32 - (A) Relação do escoamento entre a bacia principal e a sub-bacia. (B) Vazão média no período total para a sub bacia do Rio Xingu.

(A)



(B)



Fonte: O Autor (2024).

Em relação às vazões médias ao longo do ano juliano, Figura 32B, observa-se que os picos de vazão ocorrem no dia 90, com uma vazão máxima observada de 20.126 m³/s. Em

contraste, a vazão máxima calculada é registrada no dia 64, com um valor de 14.584 m³/s. Além disso, ao analisar as vazões médias, a vazão média calculada é de 8.887 m³/s, enquanto a vazão média observada é de 7.977 m³/s. Essas comparações revelam que, embora a vazão máxima observada seja maior do que a calculada, o modelo apresenta uma vazão média calculada superior à média observada.

6.2.5 Regionalização da bacia do Rio Tapajós

A tabela 13 apresenta uma análise estatística do desempenho do modelo na regionalização de parâmetros entre uma bacia calibrada e uma bacia a ser calibrada, um parâmetro que se destaca é o NSE de 0,71. Esse valor indica uma boa eficiência do modelo na previsão dos escoamentos. Esse NSE relativamente alto sugere que o modelo está capturando bem a dinâmica hidrológica das bacias analisadas, proporcionando previsões que são consistentes com as observações reais.

Ao analisar as demais métricas de desempenho, observamos um PBIAS de -11,03, um RSR de 0,54 e um R² de 0,85. O valor negativo do PBIAS indica que o modelo tende a superestimar as vazões calculadas na bacia do Tapajós em comparação com as vazões observadas. Por outro lado, o RSR relativamente baixo sugere que o modelo está capturando bem a variabilidade dos dados, com erros pequenos em relação à variabilidade dos dados observados. Isso é um bom indicativo de que o modelo está ajustando adequadamente os dados da bacia não calibrada. Além disso, o R² elevado de 0,85 reflete uma forte correlação entre os dados simulados e os dados observados, indicando que o CAWM está capturando de forma eficaz a dinâmica hidrológica da bacia do Tapajós.

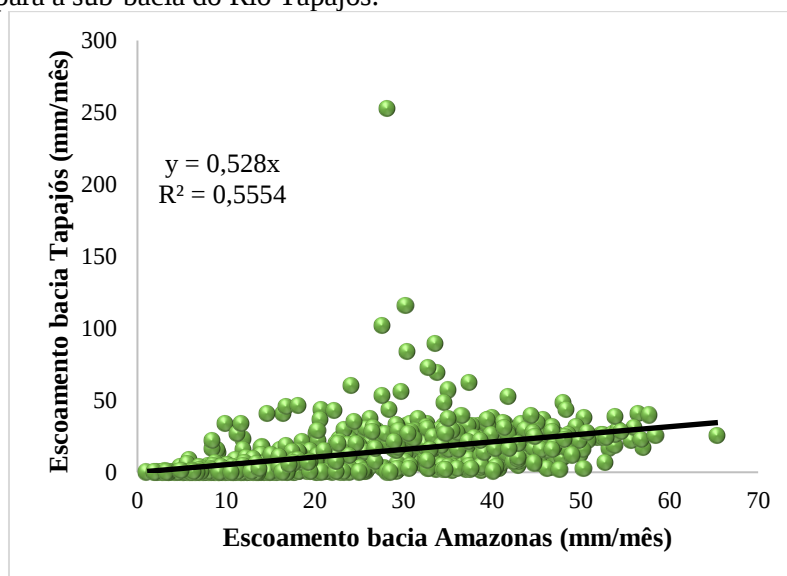
Tabela 13 - Métricas de desempenho da bacia do Rio Tapajós	
INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO	GLOBAL
Período completo: Data inicial	25/02/1996
Período completo: Data final	22/11/2010
Vazão média observada (m ³ /s)	9595,45
Vazão média calculada (m ³ /s)	8536,70
Coefficiente de eficiência Nash-Sutcliffe - NSE	0,71
NSE considerando a raiz quadrada dos valores - NSEsqr	0,72
NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog	0,26
Percentual de tendência - Pbias	-11,03
Raiz do erro médio quadrático - RMSE	3579,45
Erro médio absoluto - MAE	2417,28
Razão entre o RMSE e o desvio padrão - RSR	0,54
Coefficiente de determinação - R ²	0,85

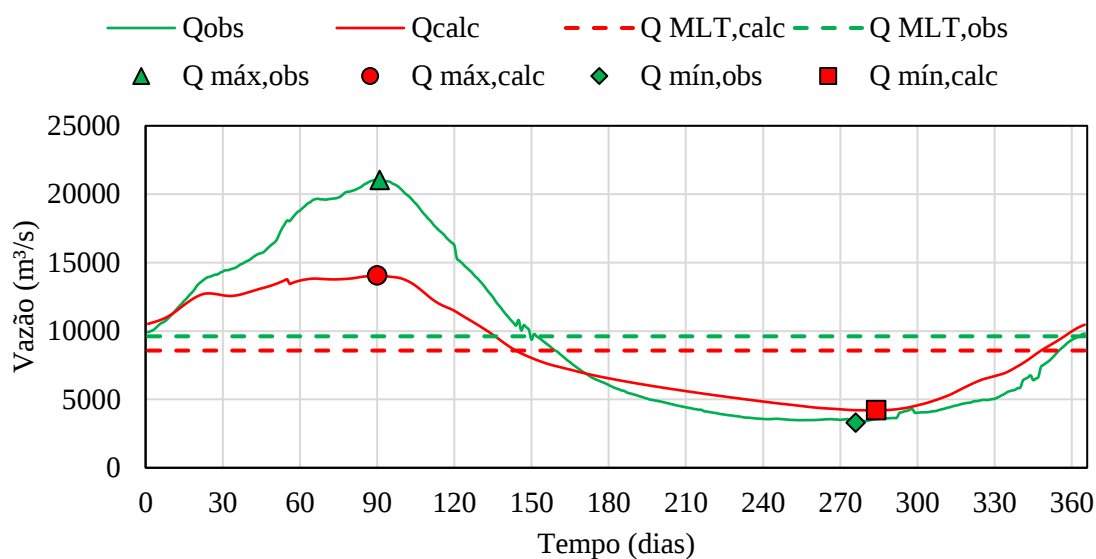
Fonte: O Autor (2024).

Inicialmente, é realizada uma análise da Figura 33-A, onde a mesma trás o valor do coeficiente angular usado na regionalização da bacia aninhada. O coeficiente angular de 0,528 sugere que a relação entre o escoamento da bacia do rio Amazonas e a bacia do rio Tapajós é relativamente baixa. Este valor indica que o modelo apresenta uma correspondência moderada entre as duas bacias em termos de escoamento, com a bacia do Tapajós respondendo de maneira menos intensa às variações no escoamento observadas na bacia do Amazonas.

Porém, é importante realizar a análise da dispersão com os dados do ERA 5, juntamente com os resultados da regionalização, observa-se que o NSE alcançou o valor de 0,71. Dessa forma, apesar da baixa correlação revelada pelo coeficiente de determinação, o valor relativamente alto do NSE indica que o modelo está desempenhando bem em termos de explicar a variabilidade dos dados na bacia do Tapajós.

Figura 33 - (A) Relação do escoamento entre a bacia principal e a sub-bacia. (B) Vazão Média no período total para a sub-bacia do Rio Tapajós.





Fonte: O Autor (2024).

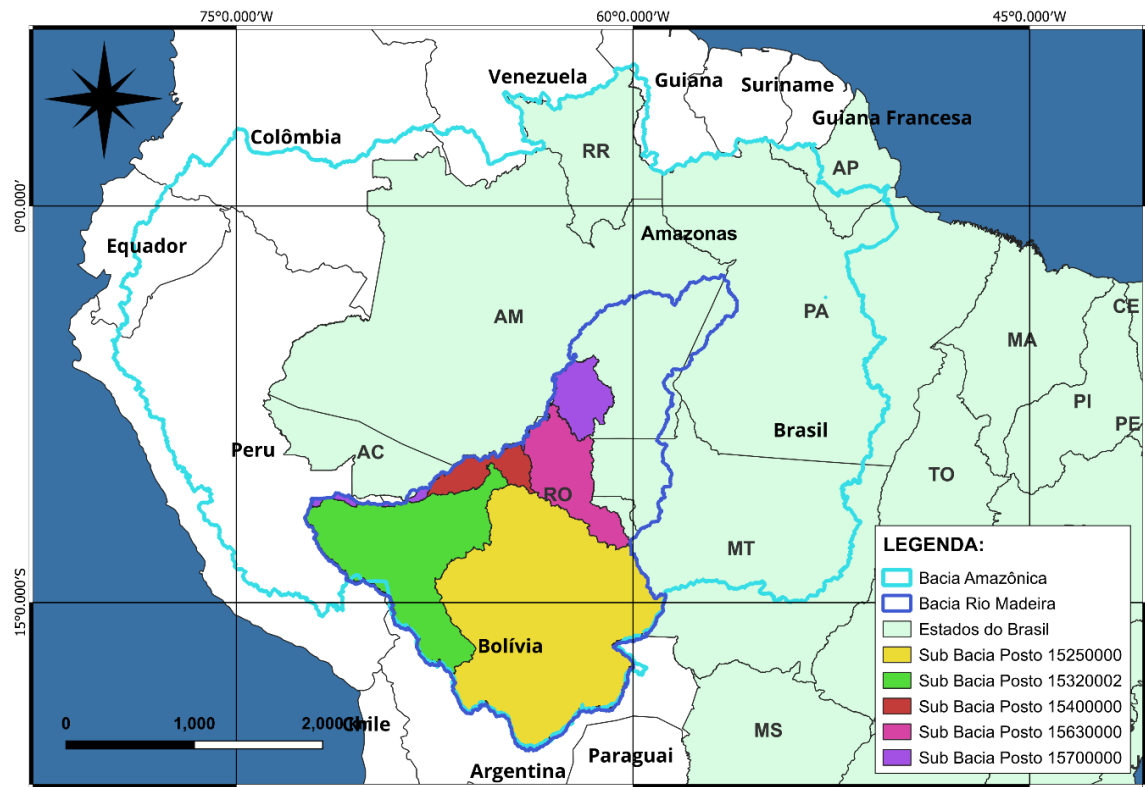
Na Figura 33-B, são apresentadas as médias das vazões diárias ao longo do ano para a regionalização da bacia do rio Tapajós. Observa-se que os picos de vazão ocorrem no dia 90 do ano juliano, com uma vazão calculada de 14.059 m³/s, e no dia 91, com uma máxima vazão observada de 21.047 m³/s.

Além disso, a média das vazões durante o período de estudo é de 10.520 m³/s para a vazão calculada e 9.611 m³/s para a vazão observada. Isso indica que a regionalização funcionou melhor para a média do escoamento.

6.3 TRANSFERÊNCIA DE PARÂMETROS ENTRE AS BACIAS ANINHADAS DO RIO MADEIRA

Após a regionalização de todas as sub-bacias da bacia principal do Amazonas e análise dos resultados obtidos, foi iniciado o processo de regionalização focado em uma das sub-bacias, agora tratada como a bacia principal. A sub-bacia escolhida foi a do Rio Madeira, que, com base no desempenho apresentado na etapa anterior, foi designada como a bacia principal para esta fase do estudo. Em seguida, foram realizadas as subdivisões em sub-bacias que estão localizadas na extensão da bacia do Rio Madeira, permitindo uma análise mais detalhada e precisa dentro deste contexto específico, representada na Figura 34. Essa abordagem visa aprimorar a modelagem e a compreensão das dinâmicas hidrológicas na área do Rio Madeira, que é considerado o foco central nessa etapa do estudo.

Figura 34 - Delimitação das bacias aninhadas ao Rio Madeira



Fonte: O autor (2024).

Vale destacar que os procedimentos metodológicos e considerações feitos anteriormente são os mesmos considerados nessa etapa. Na Tabela 14 é possível identificar os dados de maior importância de cada área de estudo, como área, perímetro e o comprimento das séries históricas de cada uma das sub-bacias.

Tabela 14 - Dados das bacias aninhadas do Rio Madeira

CÓDIGO DO POSTO FLUV.	ÁREA (km²)	PERÍMETRO (km)	LEITURA INICIAL	LEITURA FINAL
1570000000	1.149.699	9.959	27/05/1967	31/01/2020
1563000000	1.065.298	10.466	19/05/1967	30/06/2021
154000000	953.629	9.118	09/05/1967	30/06/2021
153200002	907.925	9.097	17/03/1976	30/06/2021
152500000	613032	7.331	24/01/1976	30/06/2021

Fonte: O Autor (2024).

A seguir, serão apresentados os dados da bacia principal, que servirão como base sólida para entender a eficácia e a precisão da transferência de dados entre as aninhadas do rio Madeira. Na Tabela 15, é possível identificar os parâmetros extraídos da calibração da bacia principal que serão utilizados na modelagem.

Tabela 15 - Dados considerados e calibrados da bacia principal (Posto 1570)

(Posto 1570)	CALIBRAÇÃO
Área (km²)	1.149.699
Lâmina (mm)	34078.90
Nº de dias da série histórica	19242
Ks	0,0122851
β	5,138380751

Fonte: O Autor (2024).

A seguir, serão discutidos os resultados das quatro sub-bacias aninhadas ao Rio Madeira.

6.3.1 Regionalização do Posto 1525

A Tabela 16, abaixo, apresenta os coeficientes estatísticos utilizados para avaliar o desempenho do modelo na regionalização da sub-bacia 1525, com base nos dados da bacia principal 1570. Ao analisar as métricas de desempenho, observamos que o valor do NSE é 0,90, enquanto o NSEsqrt é 0,96 e o NSElog é 0,99. Esses resultados indicam que o modelo obteve uma performance muito boa na previsão das vazões intermediárias, além de demonstrar uma alta eficiência na representação das vazões extremas, tanto as altas como as baixas vazões, como evidenciado pelos altos valores do NSEsqrt e NSElog.

Outro parâmetro relevante a ser destacado neste estudo é o RSR, que apresenta o valor de 0,32. Segundo a escala proposta por Moriasi *et al.* (2007), esse valor é classificado como eficiente, pois está abaixo da margem de 0,50. Nesse contexto, o valor de 0,32 indica que o modelo apresenta um desempenho muito bom, com erros de previsão relativamente baixos em relação à variabilidade dos dados observados. Isso sugere que a regionalização foi bem-sucedida em manter a precisão das previsões, demonstrando que o modelo é confiável e eficaz na representação das vazões.

Tabela 16 - Métricas de desempenho do Posto 1525

INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO	GLOBAL
Período completo: Data inicial	24/01/1976
Período completo: Data final	30/06/2021
Vazão média observada (m³/s)	8095,57
Vazão média calculada (m³/s)	9387,56
Coefficiente de eficiência Nash-Sutcliffe - NSE	0,90
NSE considerando a raiz quadrada dos valores - NSEsqrt	0,96
NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog	0,99
Percentual de tendência - Pbias	15,96
Raiz do erro médio quadrático - RMSE	3105,73
Erro médio absoluto - MAE	2525,00
Razão entre o RMSE e o desvio padrão - RSR	0,32
Coefficiente de determinação - R²	0,75

Fonte: O Autor (2024).

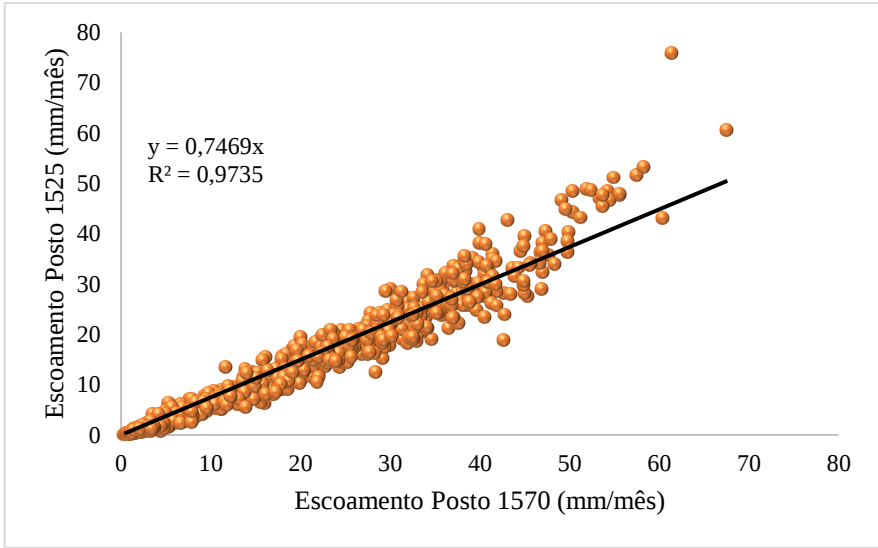
Na Figura 35, são apresentadas duas ilustrações. A primeira mostra a relação de escoamento entre a bacia principal e a sub-bacia em análise, utilizando dados do ERA 5. Esta imagem facilita a comparação do comportamento do escoamento entre a bacia principal e a sub-bacia em questão. A segunda ilustração exibe a média das vazões diárias ao longo do ano juliano para a bacia do rio Madeira, após a aplicação do processo de regionalização.

Na primeira figura, o gráfico exibe a dispersão dos dados de escoamento extraídos do ERA 5 para a bacia principal (Posto 1570) e para a sub-bacia (Posto 1525). A equação da reta ajustada ao gráfico resultou em um coeficiente angular de 0,747, que reflete a taxa de variação entre os escoamentos da bacia principal e da sub-bacia. Este coeficiente é fundamental para estabelecer a relação entre a bacia calibrada e a não calibrada, desempenhando um papel crucial no cálculo da lâmina d'água e na determinação dos parâmetros K_s e β para a bacia não calibrada. Além disso, o valor do coeficiente angular ajuda a ajustar as previsões de escoamento para garantir a precisão na modelagem hidrológica.

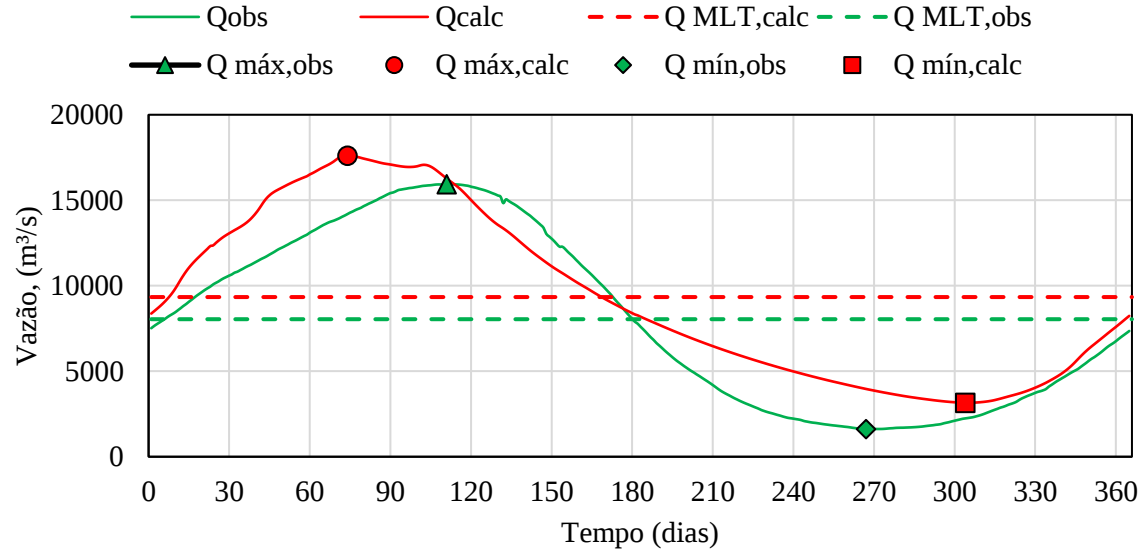
A segunda figura ilustra as médias das vazões diárias ao longo do ano para a regionalização da bacia do posto 1525. O hidrograma revela que os picos de vazão ocorrem no dia 74 do ano juliano, atingindo um valor calculado de 17.615 m³/s. Além disso, a máxima vazão observada é registrada no dia 111 do ano juliano, com um valor de 15.931 m³/s. Esta análise permite identificar os períodos de maior intensidade de fluxo, fornecendo informações importantes sobre a dinâmica sazonal da bacia e auxiliando na compreensão dos padrões de escoamento ao longo do ano.

Figura 35 - (A) Relação do escoamento entre a bacia principal e a sub-bacia. (B) Vazão média no período total para a sub-bacia do Posto 1525.

(A)



(B)



Fonte: O Autor (2024).

6.3.2 Regionalização do Posto 1532

Na regionalização do Posto 1532, a vazão média calculada foi de $18.579 m^3/s$, enquanto a vazão observada para o mesmo Posto é de $17.219 m^3/s$. Esta diferença fornece uma indicação preliminar da capacidade do modelo em reproduzir as séries de vazões durante o processo de regionalização. Para uma análise mais detalhada da eficácia do modelo, as métricas de desempenho são apresentadas na Tabela 17. O valor global do NSE foi de 0,87, evidenciando que o modelo demonstrou excelente eficiência na reprodução das vazões calculadas. Além da análise das vazões intermediárias, as métricas NSE_{sqrt} e NSE_{log} permitem avaliar o

desempenho do modelo na simulação das vazões extremas. Neste contexto, o valor do NSE para as altas vazões foi de 0,90, enquanto para as baixas vazões foi de 0,91. Esses valores indicam que o modelo apresentou um desempenho robusto na previsão de condições extremas, tanto para vazões elevadas quanto para vazões reduzidas.

Tabela 17 - Métricas de desempenho do Posto 1532

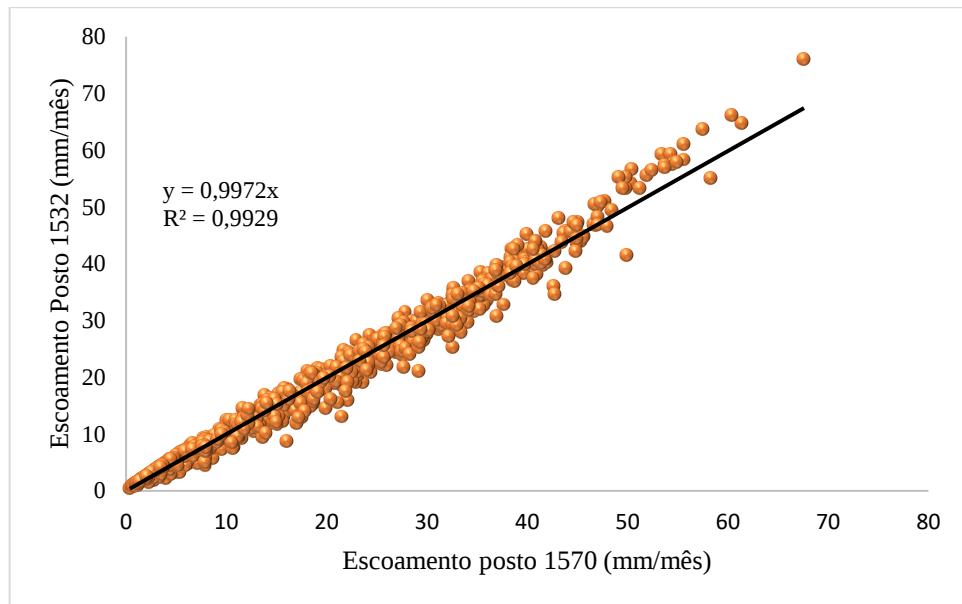
INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO	GLOBAL
Período completo: Data inicial	17/03/1976
Período completo: Data final	30/06/2021
Vazão média observada (m³/s)	17219,27
Vazão média calculada (m³/s)	18579,06
Coefficiente de eficiência Nash-Sutcliffe - NSE	0,87
NSE considerando a raiz quadrada dos valores - NSEsqrt	0,90
NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog	0,91
Percentual de tendência - Pbias	7,90
Raiz do erro médio quadrático - RMSE	7628,79
Erro médio absoluto - MAE	5424,36
Razão entre o RMSE e o desvio padrão - RSR	0,36
Coefficiente de determinação - R²	0,65

Fonte: O Autor (2024).

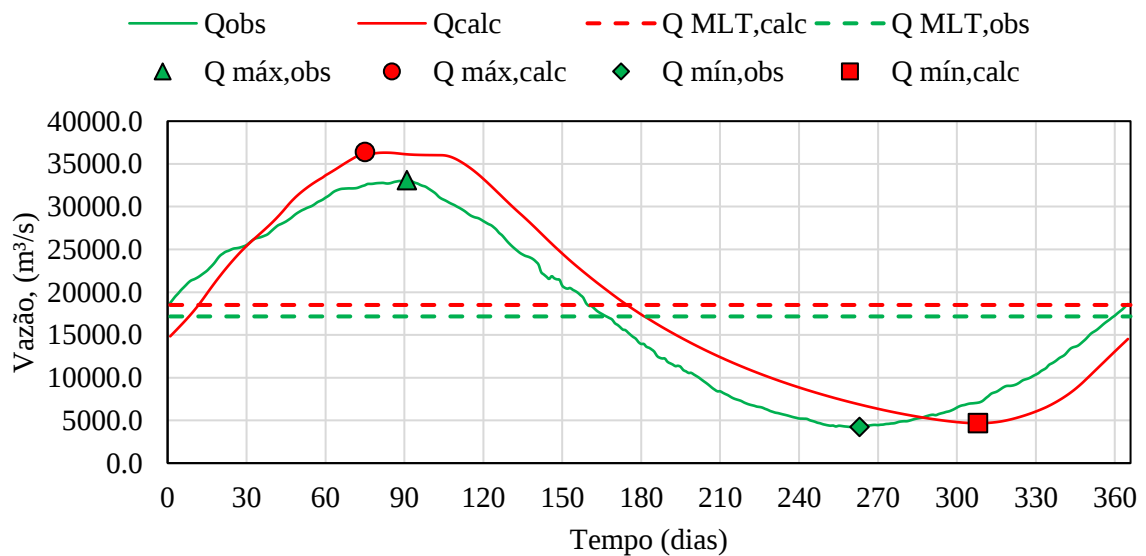
A Figura 36, abaixo, apresenta o valor do coeficiente angular utilizado na regionalização da bacia aninhada, especificamente para a bacia do Posto 1532. Na Figura 36-A, o coeficiente angular de 0,997 sugere uma forte correlação entre o escoamento da bacia do Posto 1570 e o escoamento da bacia do Posto 1532. Esse valor elevado indica há uma correspondência excepcional entre as duas bacias no que diz respeito ao escoamento. Esse resultado é corroborado pela análise paralela das métricas de desempenho do modelo, conforme discutido anteriormente. As métricas indicaram que o modelo não apenas reflete com precisão as características de escoamento entre as bacias, mas também se destaca na replicação dos dados observados, evidenciando sua eficácia geral.

Figura 36 - (A) Relação do escoamento entre a bacia principal e a sub bacia. (B) Vazão média no período total para a sub bacia do Posto 1532.

(A)



(B)



Fonte: O Autor (2024).

A Figura 36-B apresenta as médias das vazões diárias ao longo do ano para a regionalização da bacia do Posto 1532. Os dados mostram que os picos de vazão ocorrem no dia 75 do ano juliano, com uma vazão calculada de $36.391 m^3/s$, e no dia 91, com uma máxima vazão observada de $33.078 m^3/s$. A diferença entre as vazões calculada e observada durante esses picos sugere que o modelo CAWM está bem alinhado com as medições reais. Essa proximidade entre os valores calculados e observados indica que o modelo apresentou boa capacidade de previsão e reflete com precisão as variações extremas de escoamento, validando sua eficácia na simulação das condições hidrológicas da bacia.

6.3.3 Regionalização do Posto 1540

A Tabela 18 apresenta os dados estatísticos da regionalização do Posto 1540 em com os dados de referência do Posto 1570. Destacam-se, nesta análise, os coeficientes NSE e PBIAS, que possuem valores de 0,72 e 3,15, respectivamente. O NSE de 0,72 indica uma eficiência boa do modelo na previsão das vazões, sugerindo que ele captura bem a variabilidade dos dados observados. O PBIAS por sua vez apresenta valor igual a 3,15, o que revela uma ligeira tendência de superestimação das vazões pelo modelo. Adicionalmente, o valor de R^2 igual a 0,75 reforça a análise, indicando uma forte correlação entre as vazões simuladas e as observadas. Este coeficiente de determinação demonstra que uma proporção significativa da variabilidade das vazões pode ser explicada pelo modelo. Juntos, esses resultados oferecem uma visão abrangente da performance do CAWM, destacando sua eficácia na simulação das séries temporais de escoamento e identificando áreas onde ajustes podem ser necessários.

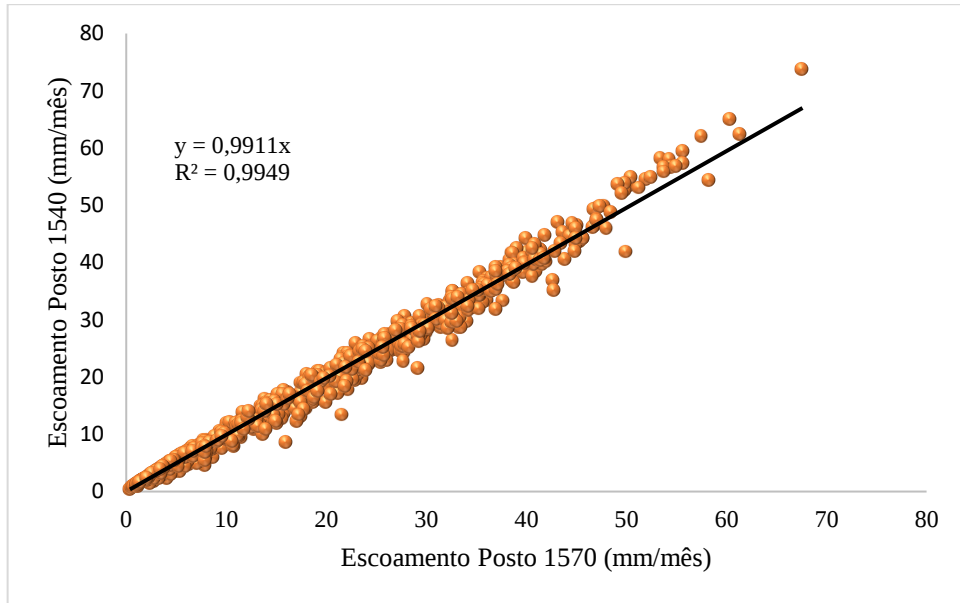
Tabela 18 - Métricas de desempenho do Posto 1540	
INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO	GLOBAL
Período completo: Data inicial	09/05/1967
Período completo: Data final	30/06/2021
Vazão média observada (m³/s)	18818,24
Vazão média calculada (m³/s)	19410,91
Coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe - NSE	0,72
NSE considerando a raiz quadrada dos valores - NSEsqrt	0,71
NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog	0,43
Percentual de tendência - Pbias	3,15
Raiz do erro médio quadrático - RMSE	6343,80
Erro médio absoluto - MAE	4943,11
Razão entre o RMSE e o desvio padrão - RSR	0,53
Coeficiente de determinação - R²	0,75

Fonte: O Autor (2024).

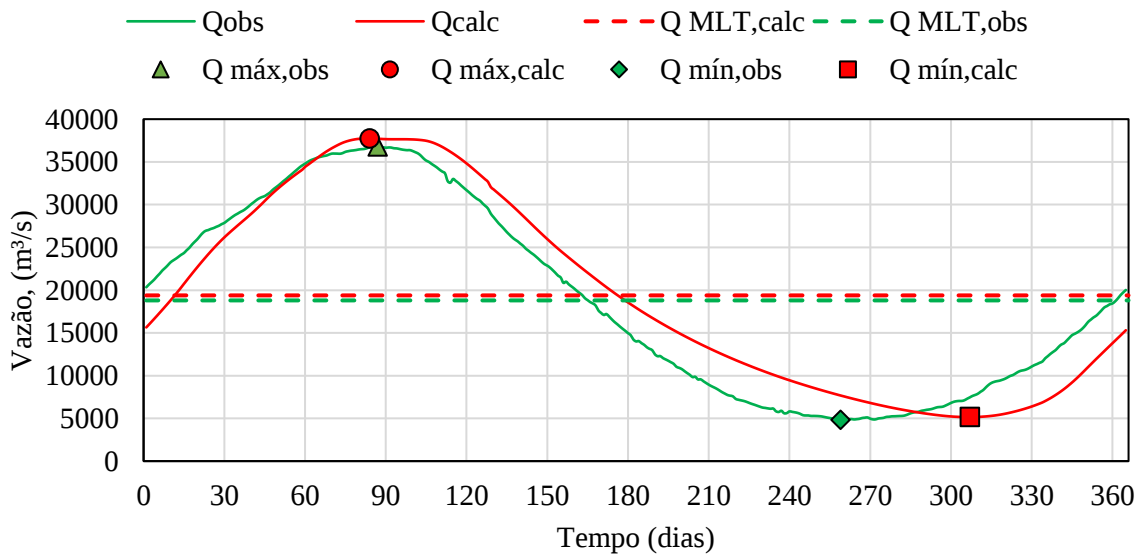
Ao examinar a Figura 37 em sua totalidade, observa-se que o coeficiente angular derivado da equação da reta que descreve a relação entre o escoamento da bacia calibrada e o da bacia não calibrada é de 0,991. Esse valor indica uma excelente correspondência e uma alta consistência na correlação entre os escoamentos das duas bacias. A robustez dessa correspondência foi acompanhada pela análise das métricas de desempenho apresentadas na Tabela 18, que demonstra que o modelo foi eficaz na representação da relação entre os dados durante a etapa de regionalização.

Figura 37 - (A) Relação do escoamento entre a bacia principal e a sub bacia. (B) Vazão média no período total para a sub bacia do Posto 1540.

(A)



(B)



Fonte: O Autor (2024).

A Figura 37-B oferece uma análise detalhada da distribuição das vazões ao longo do ano juliano. Destaca-se, em particular, que as vazões máximas observadas são de 36.800 m³/s no dia 87º, enquanto a vazão máxima calculada é de 37.746 m³/s no dia 84º do ano juliano. A proximidade dos picos de vazão entre os dados observados e os valores calculados ressalta a eficácia do modelo em replicar com precisão as variações extremas das vazões ao longo do ano. Esses resultados demonstraram a capacidade do modelo de capturar adequadamente as flutuações significativas de escoamento.

A média das vazões observadas é de 18.000 m³/s, enquanto a média das vazões calculadas é de 19.378 m³/s. A estreita proximidade entre essas duas médias ressalta a eficácia do modelo na replicação das tendências gerais dos dados hidrológicos ao longo do ano.

6.3.4 Regionalização do Posto 1563

A análise inicial da regionalização da bacia do Posto 1563, utilizando os dados da bacia calibrada, começa pela avaliação das variáveis estatísticas apresentadas na Tabela 19. Os coeficientes de eficiência NSE, NSEsqr e NSElog foram registrados com valores de 0,94; 0,97 e 0,99, respectivamente. O valor do NSE de 0,94 sugere uma performance muito boa do modelo, indicando uma alta capacidade de previsão dos escoamentos em relação aos dados observados. O NSEsqr de 0,97 e o NSElog de 0,99 corroboram a precisão do modelo, mostrando que ele é particularmente eficaz na simulação das vazões extremas e nas variações de escoamento. Esses resultados demonstram que o modelo não apenas captura bem as tendências gerais dos dados, mas também é capaz de refletir com alta precisão tanto as vazões intermediárias quanto as extremas.

No que diz respeito ao PBIAS, que apresenta um valor de -2,17, e ao R², que é de 0,80, observamos as seguintes implicações. O PBIAS negativo indica que o modelo tende a subestimar as vazões, sugerindo uma leve tendência para prever valores de escoamento abaixo das medições observadas. Por outro lado, o valor do R² de 0,80 sugere uma correspondência muito boa entre os dados simulados e os dados observados, indicando que o modelo CAWM captura de forma significativa a dinâmica hidrológica. O R² reflete a capacidade do modelo em explicar uma grande parte da variabilidade observada nas vazões, reforçando a sua eficácia geral na representação dos padrões de escoamento. Essa combinação de métricas oferece uma visão equilibrada da performance do modelo, evidenciando tanto a precisão na replicação das tendências hidrológicas quanto as áreas que podem exigir ajustes adicionais.

Tabela 19 - Métricas de desempenho do Posto 1563

INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO	GLOBAL
Período completo: Data inicial	19/05/1967
Período completo: Data final	30/06/2021
Vazão média observada (m³/s)	21729,76
Vazão média calculada (m³/s)	21257,22
Coefficiente de eficiência Nash-Sutcliffe - NSE	0,94
NSE considerando a raiz quadrada dos valores - NSEsqrt	0,97
NSE considerando os logaritmos dos valores - NSElog	0,99
Percentual de tendência - Pbias	-2,17
Raiz do erro médio quadrático - RMSE	6275,03
Erro médio absoluto - MAE	4646,75
Razão entre o RMSE e o desvio padrão - RSR	0,24
Coefficiente de determinação - R²	0,80

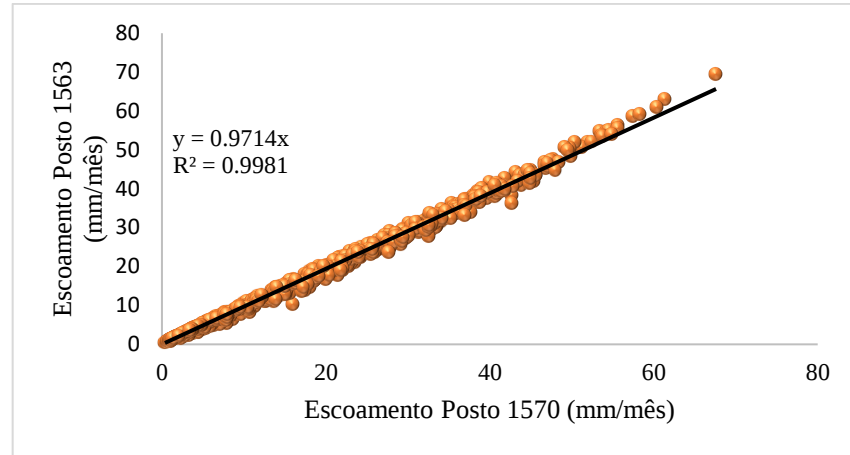
Fonte: O Autor (2024).

A Figura 38 permite a análise da correlação entre os escoamentos da bacia do Posto 1570 (bacia calibrada) e da bacia do Posto 1563 (bacia a ser calibrada). O coeficiente angular, derivado da equação da reta no gráfico de dispersão, é de 0,971. Este valor indica uma correlação elevada entre as variáveis analisadas, sugerindo que a bacia do Posto 1563 está fortemente correlacionada com a bacia do Posto 1570 em termos de escoamento. Essa alta correspondência reflete a eficácia da bacia calibrada em representar as características hidrológicas da bacia a ser calibrada, demonstrando que o modelo foi capaz de replicar com precisão as dinâmicas de escoamento entre as duas bacias.

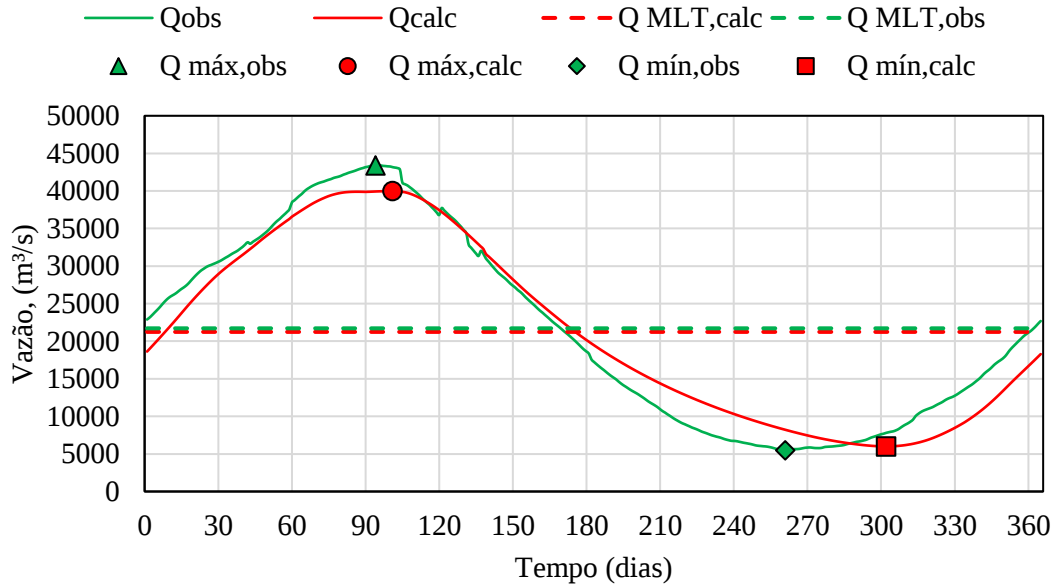
Os dados de escoamento corroboram a análise, apresentando um coeficiente de eficiência NSE de 0,94.

Figura 38 - (A) Relação do escoamento entre a bacia principal e a sub bacia. (B) Vazão média no período total para a sub bacia do Posto 1563.

(A)



(B)



Fonte: O Autor (2024).

Em relação às vazões médias ao longo do ano juliano, conforme mostrado na Figura 37B, os picos de vazão ocorrem no dia 94, com uma vazão máxima observada de $43.408 m^3/s$. Em contraste, a vazão máxima calculada é registrada no dia 101, com um valor de $39.980 m^3/s$. Adicionalmente, ao examinar as vazões médias ao longo do ano, a média calculada é de $21.238 m^3/s$, enquanto a média observada é de $21.715 m^3/s$. A diferença entre as médias calculada e observada é pequena, sugerindo que o modelo conseguiu replicar com precisão a tendência geral das vazões.

7 CONCLUSÃO

A premissa básica do presente trabalho tinha como propósito avaliar o comportamento do modelo concentrado CAWM para simular o escoamento em grandes regiões hidrográficas. Inicialmente concebido com uma perspectiva específica de simular o escoamento em bacias hidrográficas de regiões semiáridas e de tempo de concentração reduzido, o trabalho mostrou que, com as modificações aqui apresentadas, o modelo apresentou resultados entre bons e muito bons na calibração e validação quando aplicado a grandes bacias em regiões úmidas. Em complemento, o procedimento de transferência dos valores dos parâmetros para bacias aninhadas, com o suporte dos dados do satélite ERA 5, mostrou-se promissor em face a bons resultados obtidos para parte das áreas estudadas.

Na etapa de calibração e validação do CAWM aplicado a grandes bacias, observou-se que as métricas de desempenho para todas as bacias analisadas indicaram uma adequação do modelo, se destacando a bacia do Tapajós e Madeira. Assim, os resultados confirmam que o modelo é eficaz na representação das variações extremas e médias das vazões, destacando sua acurácia em simular com precisão as dinâmicas hidrológicas da bacia principal.

Entre as possíveis formas de regionalização conhecidas, buscou-se neste trabalho identificar os ajustes necessários a aplicarem aos parâmetros dos modelos entre as bacias. Como existem diferenças físicas e climáticas dentro da região em estudo, foram utilizadas séries de dados mensais disponibilizados a partir do satélite ERA 5 para retratar as diferenças de escoamento. As relações do escoamento superficial entre a bacia-alvo e a bacia principal mostrou-se variada, em alguns casos mostrando dispersão significativa, em outros ajustamento adequado. Uma das grandezas que precisa ser avaliada é o lagtime da bacia alvo, considerando que em tese não se disponha de dados de vazão para avaliar essa grandeza. A partir de diferentes relações testadas, o melhor resultado foi obtido por proporção da raiz quadrada das áreas (bacia maior e bacia aninhada). Quanto aos parâmetros coeficiente de recarga (β) e taxa de percolação (K_s), a abordagem que trouxe melhores resultados foi multiplicar os valores de calibração desses parâmetros da bacia principal pelo coeficiente angular obtido na plotagem dos dados do satélite ERA 5 (escoamento na área da bacia alvo x escoamento na área da bacia maior). Essa metodologia assegurou melhor ajuste entre as análises desenvolvidas.

Os resultados do processo de regionalização realizados a partir da bacia maior, a do rio Amazonas, em relação a suas sub-bacias teve desempenho em média regular, com bons ajustes em algumas bacias e insatisfatórios em outras. A vasta extensão das bacias e a necessidade no tratamento prévio dos dados de precipitação e vazão fora do território nacional apresentaram desafios adicionais para a regionalização, acrescidos de dispersão significativa dos dados do

ERAS 5 quando foram confrontados os escoamentos de longo período nas bacias principais versus bacias aninhadas.

Em relação ao processo de regionalização das bacias aninhadas ao Rio Madeira, cabe destacar que apresentaram valores globais de NSE muito bons para todas as bacias, evidenciando uma performance sólida do CAWM. Adicionalmente, cabe destacar que os dados do ERAS 5 indicam uma alta correlação entre as variáveis analisadas, sugerindo uma forte relação entre as bacias aninhadas e a bacia principal. Esses resultados, bem como a melhor qualidade das séries de dados de precipitação, devem estar associados aos indicadores estatísticos, como o NSE e seus derivados, quase todos classificados como muito bons.

Assim, conclui-se que o modelo CAWM demonstrou boa performance no desafio de simular o escoamento nas grandes bacias para as quais foi aplicado, bem como a metodologia aplicada para regionalização das bacias aninhadas mostrou-se promissora.

8 RECOMENDAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

A continuidade e expansão da pesquisa são essenciais para aprofundar a compreensão e melhorar a precisão dos modelos hidrológicos utilizados para a previsão de escoamentos. Embora os resultados obtidos até o momento tenham mostrado um desempenho sólido e uma boa correlação em diversos casos analisados das bacias aninhadas e da bacia principal, alguns pontos necessitam de exploração adicional para otimizar e validar os modelos de forma mais minuciosa.

Dito isso, recomenda-se como propostas de trabalhos futuros:

- Buscar e selecionar bases de dados globais de precipitação e escoamento que abrangem áreas fora do território nacional, inclusive de outros satélites além do ERA 5;
- Incorporar a extensão e a declividade dos principais rios na metodologia utilizada para calcular o tempo de defasagem (lagtime) das sub-bacias durante o processo de regionalização;
- Expandir a integração de dados provenientes de satélites na regionalização dos parâmetros utilizados na modelagem hidrológica;
- Estender o processo de regionalização dos parâmetros para outras técnicas, baseadas em análise de dados fisiográficos e hidrológicos.

REFERÊNCIAS

- ABBOTT MB, BATHURST JC, CUNGE JA, O'CONNELL PE, RASMUSSEN J. 1986a. Na introduction to the European Hydrological System – Système Hydrologique Européen (SHE): **1. History and philosophy of a physically based, distributed modelling system**. Journal of Hydrology 87:45-49.
- ABBOTT MB, BATHURST JC, CUNGE JA, O'CONNELL PE, RASMUSSEN J. 1986b. Na introduction to the European Hydrological System – Système Hydrologique Européen (SHE): **2. Structure of a physically based, distributed modelling system**. Journal of Hydrology 87:61-77.
- Abdi, D., & Gebrekristos, S. Regionalization of Low Flow Analysis in Data Scarce Region: The Case of the Lake Abaya-Chamo Sub-basin, Rift Valley Lakes Basin, Ethiopia. Arba Minch Water Technology Institute, Arba Minch, Ethiopia; **Hawassa University, Institute of Technology**, Hawassa, Ethiopia. (2022).
- Acuna P., Pizarro A. Can continuous simulation be used as an alternative for flood regionalisation? A large sample example from Chile. **Journal of Hydrology**. 2023.
- AHMED, M. I.; ELSHORBAGY, A.; PIETRONIRO, A. Toward simple modeling practices in the complex Canadian prairie watersheds. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 25, n. 6, p. 04020024, 2020.
- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. **Crop evapotranspiration — guidelines for computing crop water requirements**. FAO Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization, Rome, 1998;
- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. Crop evapotranspiration —guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. **Food and Agriculture Organization**, Rome, 1998;
- ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista da FAE**. Curitiba, vol. 20, n. 1, p. 129-137, 2017.
- ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista da FAE**, v. 20, n. 1, p. 129-137, 2017.
- ALVES SOBRINHO, T; OLIVEIRA; P.T.S.de; RODRIGUES, D.B.B.; AYRES, F.M. Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. Eng. **Agríc., Jaboticabal**, v. 30, n. 1, p. 46-57, jan./fev. 2010
- ALVES, G. J. **Aplicabilidade do método CN-SCS a uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos no Sul de MG**. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Lavras. 2016.
- ANA- Agência Nacional de Águas e Saneamento (2022). **Agências de Água**. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/fortalecimento-dos-entes-dosingreh/agencias-de-agua>. Acesso em 25 de julho de 2022.

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Curve Number da Base Hidrográfica Ottocodificada**. 2018. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/d1c36d85-a9d5-4f6a-85f7-71c2dc801a67>> Acesso em 16 de março de 2023.

Anand V., Oinam B., Wieprecht S., Singh S.K., Srinivasan R. Enhancing hydrological model calibration through hybrid strategies in data-scarce regions. **Hydrological Processes**. 2024.

ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R.; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Paraíba, vol. 17, n. 1, p. 69-76, 2013.

ANTONIETTI, N.; MONDIN, M.; CATASTINI, G.; BRIDA, G.; GENOVESE, M. Systematic numerical study of the propagation of monochromatic radiation through a stationary atmosphere in a model of plane-parallel layers. **Laser Physics**, v. 17, p. 1389-1397, 2007.

ARAÚJO, P. C. **Aplicação de modelo gr4j à bacia hidrográfica do rio Paraíba em Caraúbas**. 2005. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.

ARCOVA, F. C. S.; RANZINI, M.; NAKAGAWA, F.; DE CICCIO, V.; LIMA, I. L. Transprecipitação e interceptação da chuva em área reflorestada com *tibouchina mutabilis* cogn. na Serra do Mar. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, p. 222-240, 2020.

ARNOLD, J.G., et al. (1998) Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development 1. Wiley **Online Library**, Hoboken.

Arsenault, R., Brissette, F.P. Previsão de vazão contínua em bacias não aferidas: Os efeitos da equifinalidade e da seleção de conjuntos de parâmetros sobre a incerteza em abordagens de regionalização. **Pesquisa de Recursos Hídricos**, 50 (7), pp. 6135-6153. (2014). [http://onlinelibrary-wiley.ez16.periodicos.capes.gov.br/journal/10.1002/\(ISSN\)1944](http://onlinelibrary-wiley.ez16.periodicos.capes.gov.br/journal/10.1002/(ISSN)1944).

Asurza-Véliz, F. A., & Lavado-Casimiro, W. S. Regional Parameter Estimation of the SWAT Model: Methodology and Application to River Basins in the Peruvian Pacific Drainage. **Journal Water**, Volume(12). (2020).

Babak, A. & Deutsch, C. V. (2009). Geostatistical modeling: Theory and practice. In: **Geostatistics for Environmental Applications**. Springer, pp. 91-111.

BANCHERI, M.; SERAFIN, F.; RIGON, R. The representation of hydrological dynamical systems using Extended Petri Nets (EPN). **Water Resources Research**, v. 55, n. 11, p. 8895-8921, 2019.

BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto da dinâmica da circulação da água do sistema planície de Curuai/Rio Amazonas**. São José dos Campos. 2005. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

BARTEL, R. *et al.* Systematic visual analysis of groundwater hydrographs: potential benefits and challenges. **Hydrogeology Journal**. Estados Unidos, vol. 30, s/n, p. 359-378, 2022.

BASTOLA, S. (2022). A regionalização de um parâmetro do HYMOD, um modelo hidrológico conceitual, usando dados de o Globo. **HidroResearch**, 5, 13-21. ISSN2589-7578. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2022.01.001>.

Bedient, P. B., Huber, W. C., & Vieux, B. E. (2012). **Hydrology and Floodplain Analysis**. 5th ed. Pearson Education.

BENJAMIM, A. H. V. Introdução ao direito ambiental brasileiro. **Revista de Direito Ambiental**. Brasília, vol. 14, s/n, p. 48-82, 1999.

BERGSTRÖM, S.; LINDSTRÖM, G. Interpretation of runoff processes in hydrological modelling—experience from the HBV approach. *Hydrological Processes*, v. 29, n. 16, p. 3535-3545, 2015.

BERGSTRÖM, STEN Principles and confidence in hydrological modelling. **Nordic Hydrology**, v.22, p.123-136, 1991.

BERGSTRÖM, STEN Principles and confidence in hydrological modelling. **Nordic Hydrology**, v.22, p.123-136, 1991.

Beza, M., Hailu, H., & Teferi, G. Modeling and assessing surface water potential using combined SWAT model and spatial proximity regionalization technique for ungauged subwatershed of Jewuha Watershed, Awash Basin, Ethiopia. **Journal Avanços na Engenharia Civil, Volume(2023)**. (2023).

BICUDO, C. E. M.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. C. B. **Águas do Brasil: análises estratégicas**. 1. ed. São Paulo: Editora Instituto de Botânica, 2010.

BORSOI, Z. M. F.; TORRES, S. D. A. A política de recursos hídricos no Brasil. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, v. 4, n. 8 , p. 143-165, 1997.

BOUADILA, A.; BOUIZROU, I.; AQNOUY, M.; EN-NAGRE, K.; EL YOUSFI, Y.; KHAFOURI, A.; ... ABIOUI, M. Streamflow Simulation in Semiarid Data-Scarce Regions: A Comparative Study of Distributed and Lumped Models at Aguenza Watershed (Morocco). **Water**, v. 15, n. 8, p. 1602, 2023.

BOUCHER, M. A.; PERREAULT, L.; ANCTIL, F.; FAVRE, A. C. Exploratory analysis of statistical post-processing methods for hydrological ensemble forecasts. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 6, p. 1141-1155, 2015.

BRASIL. 1997. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989.

BRASIL. Código civil dos Estados Unidos do Brasil. Disponível em:< http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l3071impressao.htm>. Acesso em: 05 de março de 2023.

BRASIL. Constituição dos Estados Unidos do Brasil. Disponível em:< https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao34.htm>. Acesso em: 05 de março de 2023.

- BRITO, A. L.; VEIGA, J. A. P.; CORREIA, F. W.; CAPISTRANO, V. B. Avaliação do desempenho dos modelos HadGEM2-ES e Eta a partir de indicadores de extremos climáticos de precipitação para a Bacia Amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, p. 165-177, 2019.
- CASANOVA, M. A. **Banco de dados geográficos**. 1 ed. Curitiba: Editora Mundogeo, 2005.
- CAVALCANTI, B. S.; MARQUES, G. G. Recursos hídricos e gestão de conflitos. A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul a partir da crise hídrica de 2014-2015. **Revista Portuguesa e Brasileira de Gestão**, v. 15, n. 1, p. 4-16, 2016.
- CHAVES, H. M. L. et al. Regionalização de vazões mínimas em bacias através de interpolação em Sistemas de Informação Geográfica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. 2002; 7(3):45-51.
- CHAVES, J. V. B.; MENEZES, A. B. A.; DANIEL, E. J.; JÚNIOR, J. C. F. B.; CIRILO, J. A. **Análise comparativa dos modelos HEC-HMS, CAWM e GR4J aplicados às sub-bacias do Rio Parnaíba**. XVI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2022.
- CIRILO, J. A. Modelos CAWM IV e V – Memorial Descritivo. [s.d.], 2022. Disponível em: <https://www.ufpe.br/web/grh>. Acesso em: 21 de outubro de 2023.
- CIRILO, J. A.; VERÇOSA, L. F. D. M.; GOMES, M. M. D. A.; FEITOZA, M. A. B.; FERRAZ, G. D. F.; SILVA, B. D. M. Development and application of a rainfall-runoff model for semi-arid regions. **RBRH**, v. 25, 2020.
- CIRILO, J. A.; VERÇOSA, L. F. D. M.; GOMES, M. M. D. A.; FEITOZA, M. A. B.; FERRAZ, G. D. F.; SILVA, B. D. M. Development and application of a rainfall-runoff model for semiarid regions. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, vol. 25, p. 1-19, 2020.
- COLLIANDER, A. *et al.* Comparação das recuperações de umidade do solo em alta resolução com a umidade do solo SMAP durante o experimento de validação SMAP 2016 (SMAPVEX16). **Science Direct**. Estados Unidos, vol. 227, s/n, p. 137-150, 2019.
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D. G.; SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for largescale rainfall-runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 5, p. 878-895, 2007.
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D. G.; SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for largescale rainfall-runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v.52, p.878-895, 2007b.
- COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. (2013) Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais. Porto Alegre: **Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH)**.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação hidrológica de grandes bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.6, n.2, 2001.
- CORNELISSEN, T., DIEKKRÜGER, B., & GIERTZ, S. (2013). A comparison of hydrological models for assessing the impact of land use and climate change on discharge in a

tropical catchment. **Journal of Hydrology (Amsterdam)**, 498, 221-236.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013>.

CORREA, Sly Wongchuig; PAIVA, Rodrigo Cauduro Dias de; ESPINOZA, Jhan Carlo; COLLISCHONN, Walter. Multi-decadal Hydrological Retrospective: Case study of Amazon floods and droughts. **Journal of Hydrology**, v. 549, p. 667-684, jun. 2017.

COSTA, A. F. S. *et al.* Recursos hídricos. **Revista Ciências Exatas e Tecnológicas**. Sergipe, vol. 1, n. 15, p. 67-73, 2012.

COSTA, J. **Aplicação de distintas discretizações espaciais no modelo hidrológico concentrado precipitação-vazão hec-hms**. 2002. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2002.

CPRM. 2001. Serviço Geológico do Brasil. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Amazonas. Boletim Técnico.

CRAWFORD N.H. AND LINSLEY R.K. (1966). Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV. Technical Report No. 39, **Civil Engineering Department, Stanford University**, Palo Alto, California. July 1966.

CRAWFORD, N. H.; LINSLEY, R. K. **Digital simulation in hydrology, stanford watershed model IV**. 39. ed. Estados Unidos: Civil Department. Stanford University, 1996.

CRONIN, A. A.; PRAKASH, A.; PRIYA, S.; COATES, S. Water in India: situation and prospects. **Water Policy**, v. 16, n. 3, p. 425-441, 2014.

CYSNE, J. R. **Modelo conceitual para gerenciamento de recursos hídricos em ambiente de SIG**. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

DAVIDSON, E. A. *et al.* The amazon basin in transition. **NIH**. Estados Unidos, vol. 481, s/n, p. 321-328, 2012.

DE VOS, N. J.; RIENTJES, T. H. M.; GUPTA, H. V. Diagnostic evaluation of conceptual rainfall-runoff models using temporal clustering. **Hydrological Processes**, v. 24, n. 20, p. 2840–2850, 2010

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. SRTM – Shuttle Radar Topography Mission. Disponível em: Brasil em Relevo - **Embrapa Monitoramento por Satélite**. Acesso em: 07 de setembro de 2023;

FANTINATTI, P. A. P.; ZUFFO, A. C. A importância da percepção do patrimônio natural dos recursos hídricos em processos de parcelamento do solo. **Revista Labor e Engenho**. São Paulo, vol. 5, n. 2, abr./jun., 2011.

FARIAS, V. N. C.; CAMPOS, M. L. C.; TAVARES, B. R.; SOUZA, T. T. G.; CIRILO, J. A. XVI Simpósio de recursos hídricos do Nordeste 15º simpósio de hidráulica e recursos hídricos dos países de língua portuguesa. **Aplicação dos modelos CAWM e GR4H à bacia hidrográfica do Rio Mundaú–PE/AL**. 2022.

FASSONI-ANDRADE, A. C. *et al.* Amazon hydrology from space: scientific advances and future challenges. **AGU**. Estados Unidos, vol. 59, n. 4, p. 1-97, 2021.

FAYAL, M. A. A. **Previsão de Vazão por Redes Neurais Artificiais e Transformada Wavelet**. 2008. Tese de Doutorado. PUC-Rio.

Feitoza, Maria Alice Britto. **Aplicação de modelo de simulação hidrológica com regionalização de parâmetros para regiões semiáridas**. 2021. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Engenharia Civil e Ambiental, 2021.

FELDMAN A. (2000) Sistema de Modelagem Hidrológica HEC-HMS: Manual de Referência Técnica. 157.

FELINTO, C. M. R.; RIBEIRO, M. M. R.; BRAGA, C. F. C. Aplicação do Modelo Força Motriz-Pressão-Estado-Impacto-Resposta (FPEIR) para Gestão dos Recursos Hídricos em João Pessoa-PB. **Revista DAE**, v. 67, n. 218, 2019.

FERNANDES, J. A. L.; SOUSA-FILHO, J. M.; VIANA, F. L. E. Sustainable business models in a challenging context: The Amana Katu case. **Revista de Administração Contemporânea**, v. 25, n. 3, p. e200205, 2021.

FERRAZ, G. F. **Simulação hidrológica e hidrodinâmica do impacto de enchentes na bacia do rio Sirinhaém e avaliação de sistema de controle proposto**. 2019. Dissertação (Mestrado Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

FERSCH, B.; KUNSTMANN, H.; BÁRDOSY, A.; DEVARAJU, B.; SNEEUW, N. Continental-scale basin water storage variation from global and dynamically downscaled atmospheric water budgets in comparison with GRACE-derived observations. **Journal of Hydrometeorology**, v. 13, n. 5, p. 1589-1603, 2012.

FIGEIRE, C. H. U. Land use and occupation in the Fundaça Stream subbasin, Espírito Santo, Brazil. **Revista Agrogeoambiental**, v. 13, n. 1, p. 82-96, 2021.

Fischer, S., Schumann, A.H. Regionalisation of flood frequencies based on flood type-specific mixture distributivo ns. *Journal of Hydrology*. 2021.

FLEISCHMANN, A. S.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; SORRIBAS, M. V.; PONTES, P. R. M. On river-floodplain interaction and hydrograph skewness. *Water Resources Research*, 2016.

Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration Climate Database v3 – CGIAR-CSI (cgiarcsi.community). Acesso em: 04 maio 2022

GOLDMAN, C. R. *et al.* **Climatic change and global warming of inland waters: impacts and mitigation for ecosystems and societies**. 1. ed. Oxford: Editora Wiley-Blackwell, 2009.

GOMES, D. J. C.; LIMA, A. M. M.; FERREIRA, N. S.; SERRÃO, E. A. O. Variabilidade espaço-temporal da precipitação: bacia hidrográfica do Rio Madeira. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 13, n. 1, p. 90-104, jul. 2019.

GORAYEB, A.; LOMBARDO, M. A.; PEREIRA, L. C. C. Qualidade da Água e Abastecimento na Amazônia: o exemplo da bacia hidrográfica do rio Caeté (water quality and public supply conditions in the amazon region: the example of the Caeté's hydrographic river basin, eastern amazon, Brazil). **Mercator**, v. 9, n. 18, p. 135 a 157-135 a 157, 2010.

GORAYEB, A.; LOMBARDO, M. A.; PEREIRA, L. C. C. Water quality and public supply conditions in the amazon region: the example of the Caeté's hydrographic river basin, eastern amazon, Brazil. **Mercator**, v. 9, n. 18, p. 135 a 157-135 a 157, 2010.

GROSSI, C. H. Sistema de informação geográfica-Bacias 3.0 na modelagem hidrológica da bacia experimental do Rio Pardo, SP. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2003.

GUERRERO, J. V.; ESCOBAR-SILVA, E. V.; CHAVES, M. E.; MATAVELI, G. A.; BOURSCHEIDT, V.; DE OLIVEIRA, G.; ...; MOSCHINI, L. E. Assessing land use and land cover changes in the direct influence zone of the Braço Norte Hydropower Complex, Brazilian Amazonia. **Forests**, v. 11, n. 9, p. 988, 2020.

HADDAD, A. Extreme Rainfall-Runoff Events Modeling Using HEC-HMS Model for Oued El Hachem Watershed, Northern Algeria. **Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics**, v. 69, n. 1, p. 45-57, 2022.

HAMDAN, A. N. A.; ALMUKTAR, S.; SCHOLZ, M. Modelagem de precipitação e escoamento usando o modelo hec-hms para a bacia hidrográfica do rio al-adhaim, norte do iraque. **Hidrologia**, v. 8, n. 2, pág. 58, 2021.

HANSEN, J. R.; REFSGAARD, J. C.; HANSEN, S.; ERNSTSEN, V.. Problems with heterogeneity in physically based agricultural catchment models. *Journal of Hydrology*, v. 342, n. 1-2, p. 1-16, 2007.

HARTNETT, M., BERRY, A., & IRVINE, K. (2007). The use of modelling to implement the Water Framework Directive. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, 104, pp. 11-20. Fonte: <http://dx.doi.org/10.2495/RM070021>.

HERSBACH, H., BELL, B., BERRISFORD, P., et al., 2020, "The ERA5 global

IACOVIDES, Iacovos. Gestão de águas: administração e legislação. **Alocação de recursos hídricos: questões políticas e socioeconômicas em Chipre**, p. 45-63, 2011.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Rios do Brasil**. IBGE Educa Jovens, 2023. Disponível em: < <https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/territorio/18305-rios-do-brasil.html>>. Acesso em: 01 de março de 2023.

JAIN, V.; RATHORE, A.; BISEN, A.; RAJAK, K. Smart Rainwater Storage Technologies for Increasing Farmer's Economy in Rainfed and Tribal areas of Chhattisgarh. **Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci**, v. 8, p. 2083-2090, 2019.

Kavetski, D., Fenicia, F. Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 2. Application and experimental insights. *Water Resources Research*, 47 (11), art. no. W11511. (2011).

Kittel, C.M.M., Arildsen, A.L., Dybkjær, S., Hansen, E.R., Linde, I., Slott, E., Tøttrup, C., Bauer-Gottwein, P. Informing hydrological models of poorly gauged river catchments – A parameter regionalization and calibration approach. *Journal of Hydrology*. 2020.

KUANA, L. A. **Regionalização de parâmetros do modelo gr4j para a predição de vazão diária em bacias não monitoradas**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

LAASSILIA, O.; SAGHIRY, S.; OUAZAR, D.; BOUZIANE, A.; HASNAOUI, M. D. Flood forecasting with a dam watershed event-based hydrological model in a semi-arid context: case study in Morocco. **Water Practice & Technology**, v. 17, n. 4, p. 817-834, 2022.

LAMEIRA, P. I. D.; FILGUEIRAS, T. C. G. M.; BOTTER, R. C.; SAAVEDRA, R. S. An approach using multicriteria decision methods to barges configuration for pushed convoys in the Amazon. **International Journal of Information Technology & Decision Making**, v. 19, n. 01, p. 317-341, 2020.

LAVABRE, J.; ARNAUD, P.; MASSON, J. M.; FOLTON, N. Apport de la modélisation de la pluie en débit pour la connaissance de la ressource en eau et la prédétermination des crues. **La Houille Blanche**, v. 85, n. 3-4, p. 67-72, 1999.

LI, F.; ZHANG, Y.; XU, Z.; TENG, J.; LIU, C.; LIU, W.; MPELASOKA, F.. The impact of climate change on runoff in the southeastern Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology*, v. 505, p. 188–201, 2013.

LIMA FILHO, A. M. Sequência didática sobre a importância da água. **Diversitas Journal**. Alagoas, vol. 7, n. 2, p. 1153-1160, 2022.

LIMA, A. M. S., MARTINS, A. S.; FRANÇA, J. A.; CIRILO, J. A.; ALMEIDA, R. D. S. XVI Simpósio de recursos hídricos do Nordeste 15º simpósio de hidráulica e recursos hídricos dos países de língua portuguesa. **Oficina de modelagem hidrológica da UFPE: Aplicação de modelos concentrados a grandes bacias - estudo de caso da Bacia do Rio Xingu**. 2022.

LOPES, F. **Inflação e nível de atividade no Brasil: um estudo econométrico**. Texto para discussão, 1982.

LOPES, L. G. *et al.* Projeções de descargas extremas sob impactos das mudanças climáticas na região amazônica. **Revista Brasileira de Cartografia**. Rio de Janeiro, vol. 1, n. 69, p. 209-277, 2017.

MACHADO, C. J. S. Recursos hídricos e cidadania no Brasil: limites, alternativas e desafios. **Ambiente & Sociedade**, v. 6, p. 121-136, 2003.

Makhloufi, N., Elmeddahi, Y., Baba, A., & Gündüz, O. The use of the HEC-HMS model to improve regionalized hydrological modeling and its application to the Cheliff Basin, Algeria. **Journal Name**, Volume(69), pp. 242–258. 2023.

MARCUZZO, F.F.N.; MELO, D.C.R.; ROCHA, H M. Distribuição espaço-temporal e sazonalidade das chuvas no Estado do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 4, p. 157-167, 2011.

MARINHO FILHO, G. M. *et al.* Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidade. **Revista de Ciências Ambientais**. Canoas, vol. 6, n. 2, p. 35-47, 2012.

MARTINS, L. G. B. **Determinação de parâmetros hidrológicos por técnicas de sensoriamento remoto em macrodrenagem urbana**. 2012. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós Graduação e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

Meade, R.H., Rayol J.M., Conceição S.C., Natividade J.R.G. 1991. Backwater effects in the Amazon river basin of Brazil. *Environ. Geol. Water Sci.*, 18(2) : 105-114.

MELACK, J. M.; HESS, L. L.; GASTIL, M.; FORSBERG, B. R.; HAMILTON, S. K.; LIMA, I. B.; NOVO, E. M. Regionalization of methane emissions in the Amazon Basin with microwave remote sensing. **Global Change Biology**, v. 10, n. 5, p. 530-544, 2004.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. . Geoprocessamento em Recursos Hídricos Princípios, Integração e Aplicação - 2a.revisada e ampliada. 2. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013. v. 1. 535p

MENDEZ, M.; CALVO-VALVERDE, L. Assessing the Performance of Several Rainfall Interpolation Methods as Evaluated by a Conceptual Hydrological Model. *Procedia Engineering*, v. 154, p. 1050–1057, 2016.

MONTOYA, M. A.; FINAMORE, E. B. **O fluxo circular do consumo e do uso da água no Brasil e a demanda hídrica do agronegócio brasileiro**. In: 57º Congresso da Sober, Ilhéus. 2019.

MONTOYA, Marco Antônio; FINAMORE, Eduardo Belisário. As relações intersetoriais dos recursos hídricos na economia brasileira. *Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos* , v. 13, n. 4, p. 513-536, 2019.

MOREIRA, I. A. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MORIASI, D. N. *et al.* Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria. **ASABE**. Estados Unidos, vol. 58, n. 6, p. 1763-1785, 2015.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW M. W.; BINGNER, 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, n. 3, p. 885–900. 2007.

MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D.; VEITH, T.L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, v. 50(3); p. 885-900. 2007.

MURTHA, N. A.; CASTRO, J. E.; HELLER, L. Uma perspectiva histórica das primeiras políticas públicas de saneamento e de recursos hídricos no Brasil. **Ambiente & Sociedade**, v. 18, n. 3, p. 193-210, 2015.

MURTHA, Ney Albert; CASTRO, José Esteban; HELLER, Léo. Uma perspectiva histórica das primeiras políticas públicas de saneamento e de recursos hídricos no Brasil. *Ambiente & Sociedade*, n. São Paulo v. XVIII, n. 3 p. 193-210 jul.-set. 2015.

Naghdi, S., Bozorg-Haddad, O., Khorsandi, M. & Chu, X. 2021 Multi-objective optimization for allocation of surface water and groundwater resources. *Science of the Total Environment* 776, 146026.

NASONOVA, O. N. Application of a land surface model for simulating rainfall streamflow hydrograph: 2. Comparison with hydrological models. *Water Resources Research*, 274-283, 2011.

NEVES, R. R. **Caracterização hidrológica das sub bacias hidrográficas do Rio Negro e Rio Solimões**. 2017. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

NOBRE, B. V. B. **Modelagem hidrológica aplicada à avaliação da sinergia hídrica no reservatório Castanhão**. 2023. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

OLIVEIRA, A. A. A.; MEDEIROS, E. L. C.; ARAÚJO, L. F.; SILVA, E. A.; SILVA, G. L. O.; CIRILO, J. A. Simpósio de recursos hídricos do Nordeste 15º simpósio de hidráulica e recursos hídricos dos países de língua portuguesa. **Oficina de modelagem hidrológica da UFPE: Aplicação de modelos concentrados a grandes bacias - Estudo de caso da Bacia do Atlântico Nordeste Ocidental**. 2022.

OLIVEIRA, D. S. **Análise do impacto da evapotranspiração na modelagem hidrológica em regiões semiáridas e úmidas**. Dissertação de Mestrado. 2023. Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste. 2023

OLIVEIRA, D. S.; MOUSINHO, F. H. G.; CARVALHO, L. M.; MEDEIROS, L. D.; PEREIRA, M. M. A.; CIRILO, J. A. XVI Simpósio de recursos hídricos do Nordeste 15º simpósio de hidráulica e recursos hídricos dos países de língua portuguesa. **Oficina de Modelagem Hidrológica da UFPE: Aplicação de Modelos Concentrados a Grandes Bacias-Estudo de Caso da Bacia do Rio Tocantins-Araguaia**. 2022.

Oliveira, Dênia Santos de. **Análise do impacto da evapotranspiração na modelagem hidrológica em regiões semiáridas e úmidas**. 2023. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2023.

OLIVEIRA, E. A. D.; PEREZ, M. F.; BERTOLLO, L. A. C.; GESTICH, C. C.; RÁB, P.; EZAZ, T.; ...; CIOFFI, M. B. Historical demography and climate driven distributional changes in a widespread Neotropical freshwater species with high economic importance. *Ecography*, v. 43, n. 9, p. 1291-1304, 2020.

OLIVEIRA, G. P. C. **Modelagem hidrológica apoiada por sistemas de informações geográficas**. 2015. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

Oudin, L., V. Andréassian, C. Perrin, C. Michel, and N. Le Moine (2008), Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization

approaches based on 913 French catchments, *Water Resour. Res.*, 44, W03413, doi:10.1029/2007WR006240.

Paiva, R. C. D., Collischonn, W., Bonnet, M.-P., de Gonçalves, L. G. G., Calmant, S., Getirana, A., and Santos da Silva, J.: Assimilating in situ and radar altimetry data into a large-scale hydrologic-hydrodynamic model for streamflow forecast in the Amazon, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 2929–2946, <https://doi.org/10.5194/hess-17-2929-2013>, 2013.

PAIVA, Rodrigo C. D.; COLLISCHONN, Walter; BUARQUE, Diogo Costa. Validation of a full hydrodynamic model for large-scale hydrologic modelling in the Amazon. *Hydrological Processes*, v. 27, n. 1, p. 1-16, 2013.

PARPAROV, A.; GAL, G.; MARKEL, D. Water quality assessment and management of Lake Kinneret water resources: results and challenges. In: **Water Policy in Israel: Context, Issues and Options**. Dordrecht: Springer Netherlands, p. 165-179, 2013.

PASQUALETTO, A.; SOUZA, B. M. G. A.; RAIMUNDO, H. B.; PASQUALETTO, T. L. L.; PASQUALETTO, A. G. N. Diagnóstico da disponibilidade e demanda de recursos hídricos em Goiás. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 7, p. e25111730084-e25111730084, 2022.

PEREIRA, J. S. Balanço patrimonial dos recursos hídricos: a situação das regiões hidrográficas do Brasil. **Revista Águas Subterrâneas**. São Paulo, vol. 33, n. 1, p. 68-75, 2019.

PERRIN, C.; MICHEL, C.; ANDRÉASSIAN, V. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology*, v. 242, n. 3–4, p. 275–301, 2001

PERRIN, C.; MICHEL, C.; ANDRÉASSIAN, V. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. **Journal of Hydrology**, 279(1-4), 275-289, 2003.

PINHEIRO, J. A. C. *et al.* Processos hidrológicos na bacia hidrográfica do córrego Zerede em Timóteo-MG. **Revista Ciência Florestal**. Rio Grande do Sul, vol. 29, n. 4, p. 1658-1671, 2019.

PINHEIRO, V. B.; NAGHETTINI, M. Calibração de um modelo chuva-vazão em bacias sem monitoramento fluviométrico a partir de curvas de permanência sintéticas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Minas Gerais, vol. 15, n. 2, p. 143-156, 2010.

PONCE, L. C. Recursos hidrográficos e desenvolvimento socioeconômico em zonas áridas: a importância e perspectivas das novas tecnologias para o tratamento de águas naturais e/ou residuais. **Revista Chilena de Ingeniare**. Chile, vol. 17, n. 3, p. 282-284, 2009.

pp. 1999–2049. doi: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.

PRASHANTH, T.; GANGULY, S. Temporal Variation of Percolation and Evapotranspiration Components in the Water Cycle for the Ropar District, Punjab, India, Using SWAT. In: **International Conference on Hydraulics, Water Resources and Coastal Engineering**. Singapore: Springer Nature Singapore, p. 75-90, 2021.

Qi W.-Y., Chen J., Li L., Xu C.-Y., Li J., Xiang Y., Zhang S. Regionalization of catchment hydrological model parameters for global water resources simulations *Hydrology Research*, 53 (3), pp. 441 – 466. (2022).

QI, W.; FENG, L.; YANG, H.; LIU, J.; ZHENG, Y.; SHI, H.; WANG, L.; CHEN, D. Economic growth dominates rising potential flood risk in the Yangtze River and benefits of raising dikes from 1991 to 2015. **Environmental Research Letters**, v. 17, n. 3, p. 034046, 2022.

Qi, W.-Y., Chen, J., Li, L., Xu, C.-Y., Li, J., Xiang, Y., & Zhang, S. Evaluating various regionalization approaches for 2,277 catchments worldwide. *Hydrology Research*, 53(3), 441-466. (2020)

reanalysis”, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 146, n. 730,

RIBEIRO NETO, A. **Modelagem hidrodinâmica da bacia do rio Amazonas**. 2001. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2001.

RIBEIRO, B. F.; GOMES, D. J. C.; QUEIROZ, J. C. B.; PIMENTA, L. B.; MORAIS DIAS, G. F. Análise geoestatística das variáveis hidrometeorológicas na bacia hidrográfica do rio Xingu. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 04, p. 1676-1690, 2022.

RIBEIRO, C. B. D. M.; MOHANTY, B. P.; ROTUNNO FILHO, O. C.; FILGUEIRAS, E. T.; XAVIER, L. N. R.; ARAÚJO, A. A. M. D. Water balance and the moist planetary boundary layer driven by land use and land cover change across the Amazon basin. **Water**, v. 15, n. 23, p. 4052, 2023.

RIBEIRO, P. E. A. M.; HORA, M. A. G. M. Perspectiva dos 20 anos da lei n 9.433/97: percepções dos comitês de bacia hidrográfica e dos órgãos gestores de recursos hídricos acerca do enquadramento de corpos d'água. **Demandas Essenciais para o Avanço da Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 4, n. 17, p. 228-237, 2020.

RIBEIRO, W. M. N., SOUZA, J. R. S., LOPES, M. N. G.; CÂMARA, R. K. C.; ROCHA, E. J. P.; ALMEIDA, A. C. Lightning and Precipitation Produced by Severe Weather Systems Over Belém, Brazil. **Sociedade Brasileira De Meteorologia**, v. 29, n. spe, p.41, 2014.

Rocha, V. M., Correia, F. W. S., Silva, P. R. T. da, Gomes, W. B., Vergasta, L. A., Moura, R. G. de, Pereira Trindade, M. da S., Pedrosa, A. L., & Santos da Silva, J. J. Reciclagem de Precipitação na Bacia Amazônica: O Papel do Transporte de Umidade e da Evapotranspiração da Superfície. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 32, n. 3, p. 387-398, 2017.

ROSA, A. M. R.; GUARDA, V. L. M. Gestão de recursos hídricos no Brasil: um histórico. **Revista Direito Ambiental e Sociedade**. Santa Catarina, vol. 9, n. 2, p. 197-220, 2019.

Sanches, R. A.; Futemma, C. R. T.; Alves, H. Q. Indigenous territories and governance of forest restoration in the Xingu River (Brazil). *Land Use Policy*, 104755.2020.

SANTOS, H.G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª ed. Brasília: EMBRAPA, 2018. 356p.

SANTOS, L. L. Modelos hidráulicos-hidrológicos: conceitos e aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**. Recife, vol. 2, n. 3, p. 1-19, 2009.

SANTOS, S.; MONTEIRO, A.; MOURATO, S.; FERNANDEZ, P. **Os sistemas de informação geográfica na modelagem hidrológica**. Congresso nacional de tecnologias de informação geográfica, 2006.

SCHAAKE, J. C., KOREN, V. I., DUAN, Q. Y., MITCHELL, K., & CHEN, F. (1996). Simple water balance model for estimating runoff at different spatial and temporal scales. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101(D3), 7461-7475.

Schellekens, J. & Dutra, E. Martínez-de la Torre, A., Balsamo, G., van Dijk, A., Sperna Weiland, F., Minvielle, M., Calvet, J. C., Decharme, B., Eisner, S., Fink, G., Flörke, M., Peßenteiner, S., van Beek, R., Polcher, J., Beck, H., Orth, R., Calton, B., Burke, S., Dorigo, W. & Weedon, G. P. A global water resources ensemble of hydrological models: the earth2Observe Tier-1 dataset. *Earth Syst. Sci. Data* 9 (2), 389–413. 2016.

SEZEN, C.; PARTAL, T. The utilisation of conceptual and data-driven models for hydrological modelling in semi-arid and humid areas of the Antalya basin in Turkey. **Acta Geophysica**, v. 70, n. 2, p. 897-915, 2022.

SILVA, J. I. A. O. **Gestão e governança da água sob múltiplas visões e casos**. 1. ed. Campina Grande: Editora da EDUEPB, 2021.

SILVA, L. P.; EWEN, J. Modelagem hidrológica de grandes bacias hidrográficas: A necessidade de novas metodologias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 5(4), 81-92, 2000.

SILVA, M. B. Modelagem Hidrológica e Hidrodinâmica para Avaliação de Inundações na Zona Urbana de Caruaru, Pe. 109 f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2019;

SILVA, M. B.; HERREROS, M. M. A.G.; BORGES, F. Q. Gestão integrada dos recursos hídricos como política de gerenciamento das águas no Brasil. **Revista de Administração da Universidade Federal de Santa Maria**, v. 10, n. 1, p. 101-115, 2017.

SILVA, R. V.; KOBAYAMA, M. Topmodel: teoria integrada e revisão. **UFPR**. Curitiba, vol. 1, n. 14, p. 97-110, 2007.

Sivapalan, M. Prediction in ungauged basins: A grand challenge for theoretical hydrology. *Hydrol. Process.* 2003, 17, 3163–3170.

SOARES, B. M.; CALADO, G. M. C.; LEONARDO, H. R. A. L.; E OLIVEIRA, D. L. A.; CIRILO, J. A. XVI Simpósio de recursos hídricos do Nordeste 15º simpósio de hidráulica e recursos hídricos dos países de língua portuguesa. **Aplicação de modelos concentrados a grandes bacias estudo de caso da Bacia Atlântico Nordeste Oriental**. 2022.

Soni, P., Tripathi, S., & Srivastava, R. A comparison of regionalization methods in monsoon dominated tropical river basins. *Journal Name*, Volume(12,5), 1975–1996. Page Range. (2021).

SORRIBAS, Mino Viana; PAIVA, Rodrigo C. D.; MELACK, John M.; BRAVO, Juan Martin; JONES, Charles; CARVALHO, Leila; BEIGHLEY, Edward; FORSBERG, Bruce; HEIL COSTA, Marcos. Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin. *Climatic Change*, 2016.

SOUZA, C.A.; REBOITA, M.S. Intensidade do vento de dois ciclones tropicais obtida por diferentes conjuntos de dados. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n. 1, p. 067-075, 2020.

SPRUILL, C. A. *et al.* Simulation of daily monthly stream discharge from small watersheds using the swat model. **ASABE**. Estados Unidos, vol. 43, n. 6, p. 1431-1439, 2000.

SUI, D. Z.; MAGGIO, R. C. Integrating GIS with hydrological modeling: practices, problems, and prospects. **Computers, Environment and Urban Systems**. Califórnia, vol. 23, s/n, p. 35- 51, 1999.

SUN, L.; LI, Z.; ZHANG, K.; JIANG, T. Impacts of precipitation and topographic conditions on the model simulation in the north of China. **Water Supply**, v. 21, n. 3, p. 1025-1035, 2021.

TERZI, O.; DÜNDAR, C. Qualitative evaluation of theses about drinking water in our country in the last 10 years[Article@Ülkemizde son 10 yılda içme ve kullanma suyu ile ilişkili üretilen tezlerin niteliksel değerlendirilmesi]. **Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi**, 77, pp. 211-218. (2020).

TOYAMA, D.; SANTOS-JÚNIOR, C. D.; KISHI, L. T.; OLIVEIRA, T. C. S.; GARCIA, J. W.; SARMENTO, H.; ...; HENRIQUE-SILVA, F. A snapshot on prokaryotic diversity of the Solimões River basin (Amazon, Brazil). **Genetics and Molecular Research**, v. 16, n. 2, p. gmr16029567, 2017.

TSANI, S.; KOUNDOURI, P.; AKINSETE, E. Resource management and sustainable development: A review of the European water policies in accordance with the United Nations' Sustainable Development Goals. **Environmental Science and Policy**, 114, p. 570-579, 2020.

TSOU, M. S.; WHITTEMORE, D. O. User interface for ground-water modeling: ArcView extension. **Journal of Hydrologic Engineering**. Estados Unidos, vol. 5, n. 3, p. 251-257, 2001.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 1. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 1998.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2005.

TUCCI, C. E. M. Urbanização e Recursos Hídricos. pp. 113-128. In BICUDO, C. E. M. et al. (orgs.) **Águas do Brasil**. Análises Estratégicas. Academia Brasileira de Ciências; Secretaria do Meio Ambiente. Estado de São Paulo. 222 pp., 2010.

UFPE/GRH. *Manual de uso do modelo hidrológico CAWM - Campus Agreste Watershed Model*. Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos, 2021. Disponível em: <https://www.ufpe.br/web/grh>. Acesso em: (12/09/2024).

UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **MGB. HGE - Hidrologia de Grande Escala**, 2023. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/hge/mgb/o-que-e/>>. Acesso em: 01 de março de 2023.

ULLAH, I.; MA, X.; YIN, J.; ASFAW, T.G.; SYED, S. et al Evaluating the meteorological drought characteristics over Pakistan using in situ observations and reanalysis products. *International Journal of Climatology* v. 41, p. 4437-4459, 2021.

USACE-HEC. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual**. 4.2. ed. Estados Unidos: Editora US Army Corps of Engineers, Hydrology Engineering Center, 2016. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Users_Manual_4.2.pdf>. Acesso em: 19 de março de 2023.

USÓ, M. **Modelagem hidrológica hec-hms da bacia hidrográfica do rio bauru, bauru, SP**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrônômicas) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2020.

VALERIANO, M. M. **TOPODATA: Guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. São Jose dos Campos: INPE, 2008.

Van Liew, M. W., T. L. Veith, D. D. Bosch, and J. G. Arnold. 2007. Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: A comparison on USDA-ARS experimental watersheds.

VAN LIEW, M. W.; VEITH, T. L.; BOSCH, D. D.; ARNOLD, J. G. Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: comparison on USDA agricultural research service watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 12, n. 2, p. 173-189, 2007.

VIOLA, M. R.; MELLO, C. R. D.; ACERBI JR, F. W.; SILVA, A. M. D. Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, p. 581-590, 2009.

VIRÃES, M. V; CIRILO, J. A. (2019). Regionalization of hydrological model parameters for the semi-arid region of the northeast Brazil. *Brazilian Journal of Water Resources (RBRH)*, Porto Alegre, RS. V. 24, e49, <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180114>.

WAGENER, Thorsten; KOLLAT, Joshua. Numerical and visual evaluation of hydrological and environmental models using the Monte Carlo analysis toolbox. *Environmental Modelling & Software*, v. 22, n. 7, p. 1021-1033, 2007.

Walter, I.A., R.G. Allen, R. Elliott, M.E. Jensen, D. Itenfisu, B. Mecham, T.A. Howell, R. Snyder, P. Brown, S. Eching, T. Spofford, M. Hattendorf, R.H. Cuenca, J.L. Wright, and D. Martin. ASCE's standardized reference evapotranspiration equation. *Proc. 4th Nat'l. Irrig. Symp.*, ASAE, Phoenix, AZ, 2000;

Wang, W., Zhao, Y., Tu, Y., Dong, R., Ma, Q., Liu, C. Research on Parameter Regionalization of Distributed Hydrological Model Based on Machine Learning. *Water (Switzerland)*, 15 (3), art. no. 518. (2023).

WONGCHUIG, S. C.; PAIVA, R. C. D.; SIQUEIRA, V.; COLLISCHONN, W. Reanálise hidrológica ao longo do século XX: um estudo de caso da Bacia Amazônica. *Revista de Hidrologia*, v. 570, p. 755-773, mar. 2019.

WU, H.; CHEN, B.; YE, X.; GUO, H.; MENG, X.; ZHANG, B. An improved calibration and uncertainty analysis approach using a multicriteria sequential algorithm for hydrological modeling. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 16954, 2021.

XAVIER, L. N. R. **Modelagem hidrológica com o aporte de dados da missão espacial grace: aplicação a bacias brasileiras**. Rio de Janeiro. 2012. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

XU, J.; ZHANG, Q.; LIU, S.; ZHANG, S.; JIN, S.; LI, D.; WU, X.; LIU, X.; LI, T.; LI, H. Ensemble learning of daily river discharge modeling for two watersheds with different climates. **Atmospheric Science Letters**, v. 21, n. 11, p. e1000, 2020.

Xu, Z., Wu, Z., Shao, Q., He, H., & Guo, X. A two-step calibration framework for hydrological parameter regionalization based on streamflow and remote sensing evapotranspiration. *Journal Name*, Volume(613). 2022.

Yadav, M., Wagener, T., & Gupta, H. (2006). Regionalization of dynamic watershed response behaviour. *International Association of Hydrological Sciences*, (307).

Yang, Y., Liu, Y., Zhang, X., Xu, Y., & Chen, X. Research on Parameter Regionalization of Distributed Hydrological Model Based on Machine Learning. *Water*, 12(10), 2810. (2020).

YUHUAN, L. I. U.; ZHIJIA, L. I.; ZHIYU, L. I. U. Spatial combination model for semi-humid and semi-arid watersheds. **Lake Science**, v. 32, n. 3, p. 826-839, 2020.

Zhang, Y., and F. H. S. Chiew (2009), Relative merits of different methods for runoff predictions in ungauged catchments, *Water Resour. Res.*, 45, W07412, doi: doi:10.1029/2008WR007504.