



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE ACADÊMICO DO AGRESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

MARIANA DE LUCENA CORRÊIA CAMPOS

**APERFEIÇOAMENTO E APLICAÇÃO DE MODELO HIDROLÓGICO CHUVA-
VAZÃO PARA SIMULAÇÃO SUB-DIÁRIA DE EVENTOS DE CHEIAS**

Caruaru

2023

MARIANA DE LUCENA CORRÊIA CAMPOS

**APERFEIÇOAMENTO E APLICAÇÃO DE MODELO HIDROLÓGICO CHUVA-
VAZÃO PARA SIMULAÇÃO SUB-DIÁRIA DE EVENTOS DE CHEIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental. Área de concentração: Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo.

Caruaru

2023

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Paula Silva - CRB/4 - 1223

C198a Campos, Mariana de Lucena Corrêia.
Aperfeiçoamento e aplicação de modelo hidrológico chuva-vazão para simulação sub-diária de eventos de cheias. / Mariana de Lucena Corrêia Campos. – 2023.
93 f.; il.: 30 cm.

Orientador: José Almir Cirilo.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2023.

Inclui Referências.

1. Bacias hidrográficas – Pernambuco. 2. Inundações – Pernambuco. 3. Métodos de simulação. 4. Vazão – Medidores. 5. CAWM. 6. GR4H. I. Cirilo, José Almir (Orientador). II. Título.

CDD 620 (23. ed.)

UFPE (CAA 2023-095)

MARIANA DE LUCENA CORRÊIA CAMPOS

**APERFEIÇOAMENTO E APLICAÇÃO DE MODELO HIDROLÓGICO CHUVA-
VAZÃO PARA SIMULAÇÃO SUB-DIÁRIA DE EVENTOS DE CHEIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental. Área de concentração: Tecnologia Ambiental.

Aprovada em: 30/08/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Almir Cirilo (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral (Examinador Externo)

Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

AGRADECIMENTOS

A Deus por todas as bênçãos em minha vida.

Aos meus pais, Edson e Taciana, que sempre estiveram ao meu lado durante toda minha vida, me amparando nos momentos mais difíceis e vibrando com cada conquista minha.

À minha irmã, Carolina, pela cumplicidade e momentos de alegria compartilhados.

Aos amigos, que sempre torceram por mim e foram importantes em momentos decisivos da minha vida.

Ao professor José Almir Cirilo, pelo suporte e orientação, tornando esse trabalho possível de ser realizado.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta etapa da minha vida.

RESUMO

Enchentes são geralmente desencadeadas pela ocorrência de um evento extremo de precipitação, sendo influenciadas pelo relevo, cobertura e uso do solo e características de drenagem. Os eventos de cheias caracterizadas por um intervalo menor que 1 dia, ou seja, inundações repentinas, são observadas em bacias hidrográficas montanhosas e áreas urbanas com pouca permeabilidade, que quando combinado com um extremo de chuva, acarreta danos drásticos e com pouco tempo de alerta. Lidar com esse tipo de desastre requer medidas eficientes e dados de entrada sub-diários. Desta forma, a modelagem hidrológica surge como uma ferramenta não estrutural importante para subsidiar os estudos desses eventos. Assim, essa pesquisa objetiva desenvolver a adequação do modelo hidrológico CAWM – *Campus Agreste Watershed Model* para a sua utilização em simulações sub-diárias, a fim de compreender os comportamentos das cheias e inundações em bacias hidrográficas propensas a esses fenômenos. A metodologia propõe a comparação do CAWM sub-diário com o modelo GR4H – *Modèle du Génie Rural à 4 paramètres Horaires* para quatro bacias hidrográficas localizadas no estado de Pernambuco, Alagoas e Minas Gerais. Os dados de entrada incluem características físicas da bacia, informações hidrológicas, dados do solo e informações sobre a rede de drenagem. Os resultados mostraram que as adaptações realizadas, apresentam resultados satisfatórios e promissores. De modo geral, os eventos calibrados mostram métricas satisfatória e melhor desempenho do CAWM sub-diário na comparação com o GR4H. Contudo, a pouca disponibilidade e falha dos dados telemétricos foram dificuldades encontradas para desenvolver o estudo, o que justifica a análise de um número limitado de eventos. Para a validação dos eventos, os ajustes não foram satisfatórios em alguns casos, como nos eventos da bacia do rio Capibaribe para ambos os modelos. Em geral, os resultados e adaptações para a versão CAWM sub-diária são positivas. No entanto, é importante ressaltar que o modelo continua passando por aprimoramentos constantes para melhor auxiliar os estudos e as tomadas de decisão relacionadas a eventos de cheias e inundações.

Palavras-chave: cheias rápidas; modelagem hidrológica; CAWM; GR4H

ABSTRACT

Floods are generally triggered by the occurrence of an extreme precipitation event, influenced by topography, vegetation cover, and drainage characteristics. Flood events characterized by a duration of less than 1 day, namely flash floods, are observed in mountainous watersheds and urban areas with low permeability. When combined with heavy rainfall, they lead to severe damages with little warning time. Dealing with this type of disaster requires efficient measures and sub-daily input data. Thus, hydrological modeling emerges as an important non-structural tool to support the study of these events. Therefore, this research aims to adapt the hydrological model CAWM – Campus Agreste Watershed Model for its application in sub-daily simulations, to comprehend the behaviors of floods and inundations in watersheds prone to such phenomena. The methodology involves comparing the sub-daily CAWM with the GR4H model – Modèle du Génie Rural à 4 paramètres Horaires, across four watersheds located in the states of Pernambuco, Alagoas, and Minas Gerais. Input data includes physical characteristics of the watershed, hydrological information, soil data, and drainage network details. The results demonstrate that the adaptations made yield satisfactory and promising outcomes. Overall, the calibrated events show satisfactory metrics and better performance of the sub-daily CAWM compared to GR4H. However, limited availability and failures in telemetry data posed challenges in conducting the study, justifying the analysis of a restricted number of events. For event validation, adjustments were not satisfactory in some cases, such as for the Capibaribe River in both models. In general, the results and adaptations for the sub-daily CAWM version are positive. Nonetheless, it is essential to emphasize that the model continues to undergo constant refinements to better support studies and decision-making related to flood and inundation events.

Keywords: flash floods; hydrological modeling; CAWM; GR4H.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 –	Características de inundações urbanas e não urbanas.....	18
Mapa 1 –	Distribuição global das intensidades das inundações com período de retorno de 25 anos.....	20
Quadro 2 –	Definições sobre o termo Flash Floods.....	22
Figura 1 –	Diferentes tipos de ambientes propensos a inundações.....	23
Gráfico 1 –	Distribuição das pesquisas e documentos, por ano, sobre o tema "Flash Floods" na área da Engenharia.....	24
Gráfico 2 –	Pesquisas sobre "Flash Floods", por países/território.....	24
Fotografia 1 –	Praça Ismael Gouveia, em Palmares, em junho de 2010.....	27
Fotografia 2 –	Desastre causado pelas fortes chuvas no bairro de Jardim Monte Verde em 2022.....	28
Figura 2 –	Esquema do modelo CAWM IV.....	32
Figura 3 –	Esquema do modelo CAWM V.....	38
Figura 4 –	Estrutura do modelo GR4H.....	39
Figura 5 –	Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) não preenchido, Alaska..	48
Mapa 2 –	Mapa de localização das bacias hidrográficas estudadas.....	50
Mapa 3 –	Área de contribuição até o posto telemétrico 39187800.....	51
Mapa 4 –	Área de contribuição até o posto telemétrico 39770000.....	53
Mapa 5 –	Área de contribuição até o posto telemétrico 39560000.....	54
Mapa 6 –	Área de contribuição até o posto telemétrico 56850000.....	55
Mapa 7 –	Mapa de Uso e Ocupação dos Solos.....	59
Gráfico 3 –	Calibração do modelo CAWM sub-diário (2011) - Rio Capibaribe (39187800).....	67
Gráfico 4 –	Calibração do modelo GR4H (2011) - Rio Capibaribe (39187800).....	67
Gráfico 5 –	Calibração do modelo CAWM sub-diário (2022) - Rio Capibaribe (39187800).....	69
Gráfico 6 –	Calibração do modelo GR4H (2022) - Rio Capibaribe (39187800).....	69
Gráfico 7 –	Calibração do modelo CAWM sub-diário (2017) - Rio Mundaú (39770000).....	72
Gráfico 8 –	Calibração do modelo GR4H (2017) - Rio Mundaú (39770000).....	73

Gráfico 9 –	Validação do modelo CAWM sub-diário (2020) - Rio Mundaú (39770000).....	74
Gráfico 10 –	Validação do modelo GR4H (2020) - Rio Mundaú (39770000).....	75
Gráfico 11 –	Calibração do modelo CAWM sub-diário (2017) - Rio Una (39560000).....	77
Gráfico 12 –	Calibração do modelo GR4H (2017) - Rio Una (39560000).....	77
Gráfico 13 –	Validação do modelo CAWM sub-diário (2022) - Rio Una (39560000).....	79
Gráfico 14 –	Validação do modelo GR4H (2022) - Rio Una (39560000).....	79
Gráfico 15 –	Calibração do modelo CAWM sub-diário (2020) - Rio Doce (56850000).....	81
Gráfico 16 –	Calibração do modelo GR4H (2020) - Rio Doce (56850000).....	81
Gráfico 17 –	Validação do modelo CAWM sub-diário (2023) - Rio Doce (56850000).....	82
Gráfico 18 –	Validação do modelo GR4H (2023) - Rio Doce (56850000).....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Faixa de valores para os parâmetros do modelo GR4H.....	43
Tabela 2 –	Indicadores de performance recomendados na literatura.....	45
Tabela 3 –	Características básicas da bacia hidrográfica do Rio Capibaribe.....	52
Tabela 4 –	Características básicas da bacia hidrográfica do Rio Mundaú.....	53
Tabela 5 –	Características básicas da bacia hidrográfica do Rio Una.....	54
Tabela 6 –	Características básicas da bacia hidrográfica do Rio Doce.....	55
Tabela 7 –	Dados cadastrais das estações telemétricas consideradas.....	57
Tabela 8 –	Períodos escolhidos de Calibração e Validação.....	62
Tabela 9 –	Indicadores de desempenho para o evento 2011, sub-bacia 39187800.....	66
Tabela 10 –	Indicadores de desempenho para a calibração do evento 2022, sub-bacia 39187800.....	68
Tabela 11 –	Simulação cruzada para o evento 2011 validado a partir do evento 2022, sub-bacia 39187800.....	70
Tabela 12 –	Simulação cruzada para o evento 2022 validado a partir do evento 2011, sub-bacia 39187800.....	70
Tabela 13 –	Indicadores de desempenho para a calibração com evento de 2017, sub-bacia 39770000.....	71
Tabela 14 –	Indicadores de desempenho para o evento 2020, sub-bacia 39770000.....	73
Tabela 15 –	Indicadores de desempenho para a calibração do evento de 2017, sub-bacia 39560000.....	76
Tabela 16 –	Indicadores de desempenho para a validação do evento de 2022, sub-bacia 39560000.....	78
Tabela 17 –	Indicadores de desempenho na calibração do evento de 2020, sub-bacia 56850000.....	80
Tabela 18 –	Indicadores de desempenho na validação do evento de 2023, sub-bacia 56850000.....	82

LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
CAWM	Campus Agreste Watershed Model
CODECIPE	Coordenadoria de Defesa Civil
GR4H	Modèle du Génie Rural à 4 paramètres Horaires
HEC	Hydrologic Engineering Center
HMS	Hydrologic Modeling System
IDW	Inverse Distance Weighting
INMET	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital do Terreno
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NIMA	National Imagery and Mapping Agency
NSE	Eficiência de Nash
PBias	Erro Percentual Médio
PE3D	Programa Pernambuco Tridimensional
R ²	Coefficiente de Determinação,
RSR	Razão entre RSME e desvio padrão
SEMARH	Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos
SERH	Secretaria Executiva de Recursos Hídricos
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
USACE	United States Army Corps of Engineers
USGS	United States Geological Survey

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	OBJETIVOS.....	16
1.1.1	Objetivo Geral.....	16
1.1.2	Objetivos Específicos.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1	INUNDAÇÕES SEVERAS.....	17
2.1.1	Mudanças Climáticas Versus Inundações.....	19
2.1.2	<i>Flash Floods.....</i>	21
2.2	EVENTOS DE CHEIAS.....	26
2.3	MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	29
2.4	MODELAGEM HIDROLÓGICA – CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL – CAWM.....	31
2.4.1	CAWM IV.....	32
2.4.2	CAWM V.....	37
2.5	<i>MODÈLE DU GÉNIE RURAL À 4 PARAMÈTRES HORAIRE</i> – (GR4H)..	39
2.6	INDICADORES DE PERFORMANCE UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO.....	44
2.7	BASES DE DADOS ESPACIAIS.....	46
2.7.1	Projeto Pernambuco Tridimensional – PE3D.....	46
2.7.2	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i> – SRTM.....	48
3	METODOLOGIA.....	50
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	50
3.1.1	Localização e Generalidades.....	51
3.2	DADOS HIDROLÓGICOS.....	56
3.2.1	Dados Pluviométricos.....	56
3.2.2	Dados Fluviométricos.....	56
3.3	DADOS PE3D E SRTM.....	57
3.4	USO E OCUPAÇÃO DE SOLO.....	58
3.5	MODELO CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL – CAWM.....	60
3.5.1	Adaptações para o Modelo Sub-diário.....	60
3.6	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO.....	61

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	64
4.1	EVENTOS DA SUB-BACIA 39187800 – SÃO LOURENÇO DA MATA (CAPIBARIBE).....	65
4.2	EVENTOS DA SUB-BACIA 39770000 – RIO LARGO (MUNDAÚ).....	70
4.3	EVENTOS DA SUB-BACIA 39560000 – PALMARES (UNA).....	75
4.4	EVENTOS DA SUB-BACIA 56850000 – GOVERNADOR VALADARES – MG (RIO DOCE).....	79
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	84
	REFERÊNCIAS	85

1 INTRODUÇÃO

A água, elemento essencial para a vida humana sob múltiplas facetas, está por trás de muitos desastres naturais relacionados aos recursos hídricos. Geralmente, esses desastres estão ligados a excessos de água, como inundações e rompimento de barragens, ou à sua escassez, como secas, estiagens prolongadas e problemas de abastecimento hídrico. Esses eventos extremos têm sido objeto de estudo, como destacado por Londe *et al.* (2014). Além disso, as transformações no ciclo hidrológico e seus processos, associados às mudanças climáticas, têm provocado interesse, conforme discutido por Whang *et al.* (2021).

O processo de urbanização também desempenha um papel crucial nesse contexto. O crescimento desordenado dos centros urbanos amplia as áreas de solos impermeáveis em paralelo ao aumento demográfico, afetando a infraestrutura urbana, especialmente os sistemas hídricos. Um dos impactos notáveis desse processo é o aumento na frequência e intensidade das inundações urbanas, como salientado por Jacobson (2011). As inundações são incidentes de considerável relevância, classificados como alguns dos eventos mais recorrentes e destrutivos a nível global (Hirabayashi *et al.*, 2013; Li & DeLiberty, 2020). As perdas econômicas oriundas de inundações atingem cifras bilionárias (Munich, 2022).

Um aspecto característico das cheias é a curta duração dos intervalos entre as precipitações e os picos de vazão, que podem ser inferiores a um dia. Nesse contexto, as "Flash Floods", ou "Cheias Rápidas", se destacam. Tais eventos ocorrem em um espaço de tempo limitado, dificultando sua previsão. As áreas montanhosas e as regiões com baixa permeabilidade são particularmente suscetíveis a essas cheias, que, quando combinadas com chuvas extremas, podem provocar deslizamentos de terra e ameaças à sociedade e ao patrimônio, como apontado por Lima Neto (2019).

Na América Latina, incluindo o Brasil, os riscos de inundações estão principalmente associados às características das bacias e às deficiências nas infraestruturas urbanas, especialmente em termos de drenagem, conforme destacado por Stevaux *et al.* (2009). No Brasil, casos de cheias e inundações são observados em todo o território, abrangendo regiões como Santa Catarina, a Região Amazônica e os estados de São Paulo e Rio de Janeiro.

A região Nordeste, caracterizada por um clima semiárido e frequentes eventos de escassez hídrica, não está isenta de cheias catastróficas, especialmente nas áreas urbanas. Esses eventos têm ocorrido em estados como Alagoas e Pernambuco, sendo este último palco de ocorrências de chuvas intensas seguidas de inundações alarmantes desde 1632.

Diante dos eventos de cheias em Pernambuco, Alagoas e outras regiões do Brasil, bem como das suas características, torna-se crucial a tomada de decisões informadas e estudos destinados a compreender o comportamento desses eventos e a desenvolver medidas de mitigação. Segundo Jeong *et al.* (2010), simulações de eventos de curta duração requerem ferramentas computacionais adaptadas às particularidades desses eventos.

As inundações, resultantes de chuvas intensas, causam prejuízos socioeconômicos significativos. Nesse contexto, a modelagem hidrológica é empregada, geralmente com dados de entrada diários, para simular e prever esses eventos. Essa modelagem rastreia o processo de precipitação ao longo da bacia, culminando na estimativa das vazões e dos picos de vazão ao longo dos cursos d'água (Wang *et al.*, 2022). Contudo, dado que muitas bacias hidrográficas possuem tempos de concentração inferiores a um dia, o uso de dados de entrada subdiários se faz necessário, como já tem sido praticado. Assim, considerando que cheias podem ocorrer em intervalos curtíssimos, é indispensável redefinir os modelos hidrológicos de resolução diária e seus parâmetros para capturar essas ocorrências.

No âmbito da modelagem hidrológica, a literatura apresenta uma variedade de modelos, diferindo em natureza, equacionamentos, relações espaciais, temporais e seleção de eventos. Nesse contexto, o modelo Campus Agreste Watershed Model (CAWM) e o *Modèle du Génie Rural à 4 paramètres Horaires* (GR4H) é adotado para esta pesquisa.

O modelo Campus Agreste Watershed Model – CAWM, um desenvolvimento originado na Universidade Federal de Pernambuco, constitui-se como um modelo hidrológico de chuva-vazão. Este modelo é caracterizado por sua abordagem conceitual e foco concentrado, fundamentado na premissa de simplicidade e na minimização do número de parâmetros requeridos para calibração. Sua principal finalidade consiste em representar o processo de escoamento superficial dentro de bacias hidrográficas, considerando tanto ambientes semiáridos quanto úmidos. O modelo se desdobrou em duas variantes: a Versão IV, voltada para rios intermitentes, e a Versão V, direcionada para rios perenes. Seu objetivo subjacente é aprimorar a representação dos ciclos hidrológicos que ocorrem nessas distintas tipologias de bacias, visando contribuir para um entendimento mais profundo desses sistemas complexos.

O modelo CAWM IV teve seu desenvolvimento iniciado e seu conceito introduzido em trabalhos acadêmicos em 2019. Gomes (2019) explorou a modelagem hidrológica em bacias hidrográficas no território pernambucano, obtendo resultados que variaram de aceitáveis a bons. Ferraz (2019), por sua vez, analisou o impacto e a magnitude dos eventos de cheias na bacia do Rio Sirinhaém. Em 2020, o modelo foi oficialmente apresentado em um artigo por Cirilo *et al.* (2020) para regiões semiáridas, onde foram demonstrados formulações, esquemas e resultados

para diferentes bacias hidrográficas. Nesse contexto, o modelo CAWM exibiu um comportamento satisfatório ao simular os eventos analisados. Posteriormente, foi empregado na bacia do Capibaribe, em comparação com o modelo HEC-HMS, como apresentado por Gomes, Verçosa e Cirilo (2021).

À medida que as aplicações do CAWM foram progredindo, o foco das investigações expandiu para incluir regiões caracterizadas por climas mais úmidos. Em resposta a essa ampliação de escopo, o CAWM passou por revisões e aprimoramentos, com o objetivo de acomodar não apenas as características do semiárido, mas também das áreas úmidas e rios perenes. Essa evolução culminou no desenvolvimento da versão V do modelo (CIRILO, 2022).

Em Oliveira *et al.* (2022), o modelo CAWM V foi empregado como ferramenta de modelagem hidrológica na bacia do rio Tocantins-Araguaia. Em comparação paralela com os modelos GR4J e HEC-HMS, o CAWM V apresentou os melhores resultados, com classificações variando entre aceitáveis e bons. Da mesma forma, o estudo conduzido por Soares *et al.* (2022) examinou a região da bacia do Atlântico Nordeste Oriental. Embora tenha sido destacada a dificuldade nas simulações devido à presença de barragens e à escassez de dados, o modelo CAWM V proporcionou resultados satisfatórios na maior parte das circunstâncias.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Aprimorar o modelo hidrológico CAWM – Campus Agreste Watershed Model para sua utilização em modelagem sub-diária em bacias hidrográficas caracterizadas por eventos de cheias e inundações, em especial as cheias rápidas, as chamadas “*flash floods*”.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Identificar as modificações que devem ser feitas no modelo CAWM, em que as simulações são feitas em passo de tempo diário, para que o modelo possa também se adequar às simulações sub-diária.
- b) Realizar a modelagem hidrológica de chuva-vazão com intervalo de tempo sub-diário para as cheias rápidas nas bacias hidrográficas de estudo.
- c) Avaliar a performance dos resultados das simulações dos Modelos CAWM e GR4H.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, é apresentado um breve levantamento teórico sobre as inundações repentinas e suas características, bem como um panorama dos eventos de cheias ocorridos no Brasil ao longo dos anos. Além disso, são abordados o uso da modelagem hidrológica na simulação desses eventos e um compêndio de estudos relacionados ao tema.

2.1 INUNDAÇÕES SEVERAS

A história testemunha que o ser humano, desde a antiguidade, tem buscado conviver com as inundações, optando por ocupar áreas mais elevadas do relevo, onde os rios dificilmente alcançariam (Tucci; Bertoni, 2003). Nas duas últimas décadas, estudos têm fornecido evidências sólidas e projeções sobre o aumento na frequência e intensidade de desastres naturais, especialmente aqueles relacionados a fatores climáticos (Guha-Sapir *et al.*, 2012; IPCC, 2007; Vink *et al.*, 1998).

Recentes análises colocam o Brasil entre os 15 países com maiores índices de populações expostas a riscos de inundações. Tais eventos são considerados entre os desastres mais onerosos devido à vasta gama e extensão dos danos resultantes. De acordo com o Relatório de Desastres Naturais na América Latina e Caribe, foram registrados prejuízos totalizando US\$ 1 bilhão decorrentes de danos causados por 12 eventos ocorridos entre 2000 e 2019 na região (Ocha, 2019).

No cenário nacional, o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (UFSC, 2013) oferece um panorama dos desastres naturais ocorridos entre 1991 e 2012, incluindo inundações graduais e inundações bruscas (enxurradas), as quais se posicionam como a segunda tipologia mais recorrente de desastre natural no Brasil.

Entre janeiro de 2013 e fevereiro de 2023, os desastres naturais resultaram em prejuízos estimados em cerca de US\$ 401,3 bilhões em todo o país. Vale ressaltar que o primeiro semestre de 2022 foi marcado por eventos catastróficos, resultando em centenas de fatalidades e pessoas desaparecidas (CNM, 2023).

Conforme Tucci (2007), as enchentes podem ser originadas por dois processos: enchentes em áreas ribeirinhas, de natureza natural, e as cheias resultantes da urbanização. Quanto às inundações, tanto em contextos urbanos quanto rurais, Piadeh, Behzadian e Alani (2022) detalham, em sua revisão, as principais características das cheias com base em critérios apresentados nos itens do Quadro 1. Além disso, ressaltam a relevância de estudar esses

aspectos para análises de previsão de inundações, um tópico que será explorado em maior profundidade no presente estudo.

Quadro 1 - Características de inundações urbanas e não urbanas.

Características	Sistemas de Drenagem	
	Áreas Urbanas	Áreas não urbanas
Descrição da inundação	- Transbordamento de infraestruturas de drenagem urbana por falta de drenagem adequada	Transbordamento ou elevação de corpos d'água, como rios, córregos, nível do mar e reservatórios
Causas de inundação	- escoamento superficial principalmente rápido gerado pela chuva	- Principalmente alta intensidade de chuva ou acúmulo de escoamento superficial
Duração da inundação	- Entre alguns minutos a alguns dias	- Parte de dias a uma semana
Impactos de inundações espaciais	- Pequenas áreas, ou seja, ruas para bairros, podendo ser estendidas a todas as áreas urbanas, mas altamente distribuídas	- Grande escala, como zonas vulneráveis e zonas ribeirinhas
Restrições espaciais para gerenciamento de inundações	- Sem flexibilidade em superfícies de terra ou modificação subterrânea como anteriormente ocupada - Variação rápida no uso da terra	- Menores restrições em áreas não urbanas
Principais tipos de impactos	- Perda econômica e interrupção de negócios - Perda humana, problemas mentais e sociais - Estrutura urbana e danos à infraestrutura	- Erosão do solo - Desperdiçando colheitas e gado - Perda de habitat natural - Poluição da água - Danos no reservatório ou na infraestrutura de água

Fonte: Piadeh; Behzadian; Alani (2022)

Outros aspectos relevantes das inundações compreendem sua forma de ocorrência e sua duração. As inundações bruscas, comumente conhecidas como enxurradas, inundações repentinas, denominadas internacionalmente "*Flash Floods*", caracterizam-se por um escoamento superficial de alta velocidade e energia. Esses eventos decorrem de chuvas intensas e concentradas em áreas específicas, frequentemente observadas em bacias hidrográficas de pequeno porte e terrenos acidentados ou montanhosos (BRASIL, 2013). Aspectos cruciais e pesquisas recentes acerca das "*Flash Floods*" são minuciosamente abordados na subseção 2.1.2.

2.1.1 Mudanças Climáticas Versus Inundações

O processo de urbanização e as mudanças climáticas estão provocando alterações no ciclo natural da água nas bacias hidrográficas. No contexto de urbanização, a cobertura do solo, previamente permeável, se transforma em impermeável devido à expansão de construções, especialmente em áreas ribeirinhas. Consequentemente, o escoamento superficial das águas pluviais se acelera ao longo do trajeto, enquanto a capacidade de infiltração diminui (Jeong *et al.*, 2010).

Nesse cenário, a complexa interação entre o meio ambiente e a atividade humana reflete as mudanças climáticas observadas por especialistas ao longo dos anos. Esses especialistas destacam que os efeitos das mudanças climáticas aumentam à medida que o aquecimento global progride, abrangendo desde questões alimentares até o aumento do nível do mar. Essas mudanças intensificam o risco de inundações catastróficas, gerando instabilidade tanto nas sociedades quanto nos ecossistemas globais de forma sem precedentes.

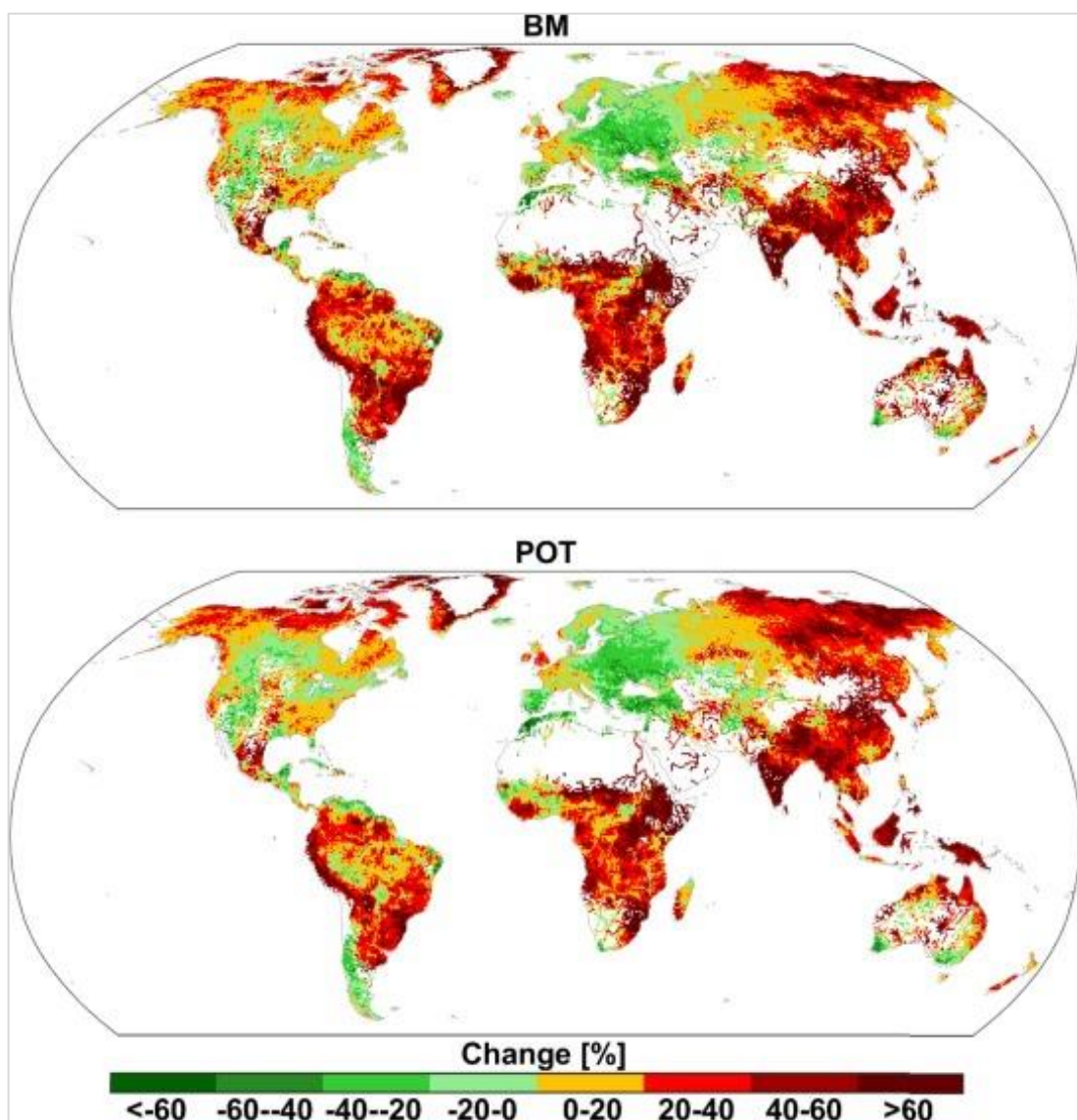
O estudo conduzido por Shao *et al.* (2020) analisou os efeitos da urbanização nas inundações no Texas, evidenciando como a urbanização reduz o atraso temporal, mas eleva os picos de inundação em até 30%. Além disso, a análise da cobertura do solo revelou que quando as mudanças climáticas ocorrem de forma gradual ou quase imperceptível, elas emergem como o fator predominante no aumento das inundações.

Nos últimos anos, diversos estudos têm examinado a correlação direta entre mudanças climáticas globais e o aumento da frequência de desastres naturais. No campo dos recursos hídricos, essa relação tem sido explorada em relação ao aumento progressivo das inundações e da precipitação extrema (Madsen *et al.*, 2014; Avand; Moradi; Lasboyee, 2020; Zhang *et al.*, 2021; Xuan *et al.*, 2021). Por exemplo, Yun *et al.* (2020) demonstram que nas regiões asiáticas as mudanças climáticas podem resultar em um aumento de até 45% na ocorrência de inundações e um incremento de 14% na magnitude desses eventos. No entanto, a implementação apropriada de medidas de operação de reservatórios pode reduzir, respectivamente, entre 16% e 36% a magnitude e a frequência das inundações.

Considerando uma análise global, abrangendo as diferentes estações do ano e empregando a Teoria do Valor Extremo, um método utilizado para identificar eventos extremos, Tabari (2021) realizou uma comparação entre dois métodos: BM (Block Máxima) e POT (Método de Pico Acima do Limiar). Ambos os métodos convergiram para a conclusão de que as intensidades das inundações tendem a aumentar em escala global, considerando os períodos de retorno de 25 anos (Mapa 1). Cerca de 78% e 76% das regiões analisadas exibem esse

aumento, respectivamente. Adicionalmente, a análise ressalta que as mudanças nas intensidades de inundação não são homogeneamente distribuídas pelo globo. Em áreas como o sul e sudoeste da Ásia, América do Sul e África, a intensidade ganha destaque, como indicado pelas cores mais quentes no mapa, ao passo que regiões como Europa Central, Norte e Oriental, parte sul da Argentina e Chile e partes centrais dos EUA e Canadá, apresentam resultados indicativos de redução nessa intensidade, conforme a escala de cores disposta na figura.

Mapa 1- Distribuição global das intensidades das inundações com período de retorno de 25 anos.



Fonte: A Autora (2023).¹

¹ Nota: Adaptado de Tabari (2021)

No estudo conduzido por Wasko *et al.* (2021), destaca-se que as pequenas cheias, aquelas que contribuem para o aumento dos níveis dos reservatórios de abastecimento de água, estão apresentando uma tendência de diminuição. Em contrapartida, os eventos extremos de inundação, que se manifestam em proporções substanciais, estão demonstrando um aumento em escala global, acarretando riscos tanto em termos de infraestrutura física quanto à segurança humana. Isso sugere que a intensificação dos eventos extremos de cheia está ocorrendo às custas das ocorrências de menor magnitude, ou seja, a variabilidade do processo está sendo acentuada.

Numerosos estudos têm se dedicado a analisar os efeitos, características e outras propriedades das cheias, cujo potencial devastador pode ser exacerbado quando se trata de inundação rápida.

2.1.2 Flash Floods

Dentre os diversos tipos de cheias, algumas ocorrem em bacias hidrográficas específicas, onde o intervalo temporal entre um evento de precipitação e o pico máximo correspondente de vazão é da ordem de horas, e até mesmo minutos, sendo este o enfoque do presente estudo. A esses eventos é atribuído o nome de inundações repentinas, também conhecidas como “*flash floods*”. Estas se distinguem de outras formas de inundação pela curta duração entre o evento de chuva extremo e o pico máximo da vazão no corpo d'água, assim como pela característica de serem inundações localizadas. Consequentemente, devido ao reduzido tempo de formação do evento, esse tipo de inundação causa significativos danos, oferecendo um intervalo insuficiente para alertas de risco adequados (Miao *et al.*, 2016; Lima Neto, 2019).

O termo em inglês, “*Flash Floods*”, assume diversas definições, como minuciosamente enumerado por Goerl e Kobiyama (2005) em seu estudo sobre inundações no Brasil. Esse contexto é apresentado de maneira abrangente no Quadro 2, o qual ilustra que a exploração desse termo teve início antes dos anos 2000. No entanto, no cenário brasileiro, esse termo é utilizado em pesquisas para se referir a diferentes fenômenos, tais como enxurradas, inundações repentinas, inundações súbitas e sinônimos correspondentes.

Quadro 2 - Definições sobre o termo *Flash Floods*.

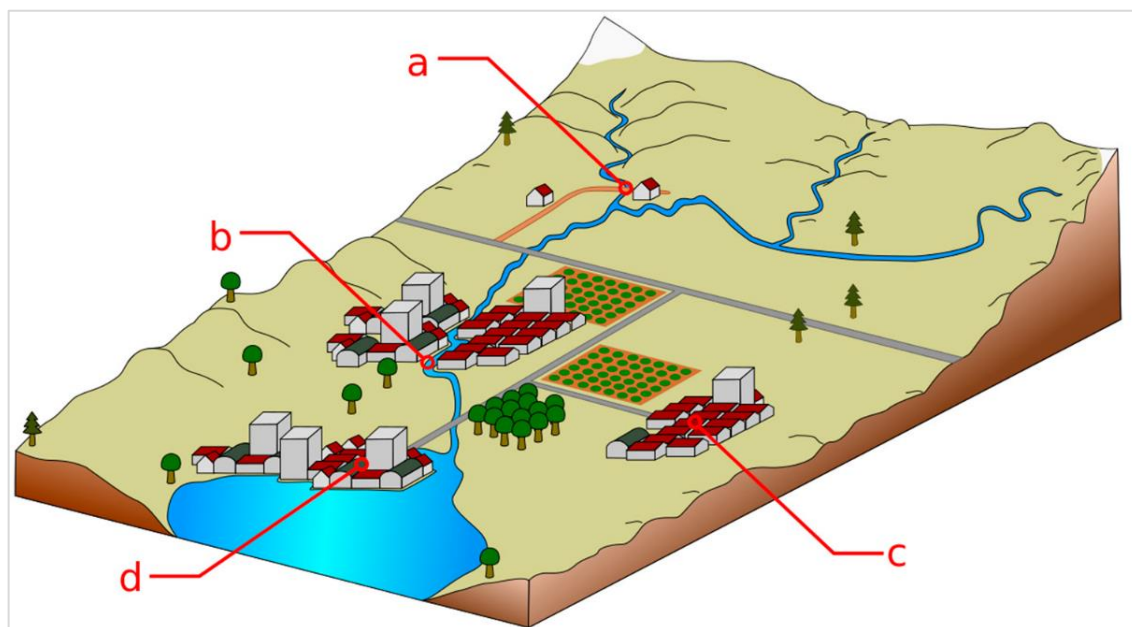
TERMO	AUTOR	DEFINIÇÕES
<i>Flash flood</i>	National Disaster Education Coalition (2004)	Inundações bruscas que ocorrem dentro de 6 horas, após uma chuva, ou após a quebra de barreira ou reservatório, ou após uma súbita liberação de água armazenada pelo atolamento de restos ou gelo.
<i>Flash flood</i>	NWS/NOAA (2005)	Uma inundação causada pela pesada ou excessiva chuva em um curto período, geralmente menos de 6 horas. Também uma ruptura de barragem pode causar inundação brusca, dependendo do tipo de barragem e o período decorrido.
<i>Flash flood</i>	FEMA (1981)	Inundações bruscas usualmente consistem de uma rápida elevação da superfície da água com uma anormalmente alta velocidade das águas, frequentemente criando uma parede de águas movendo-se canal abaixo ou pela planície de inundação. As inundações bruscas geralmente resultam da combinação de intensa precipitação, numa área de inclinações íngremes, uma pequena bacia de drenagem, ou numa área com alta proporção de superfícies impermeáveis.
<i>Flash flood</i>	Choudhury et al. (2004)	Inundações bruscas de curta duração e que duram de algumas horas a poucos dias e originam-se de pesadas chuvas.
<i>Flash flood</i>	IAHS-UNESCO-WMO, (1974)	Súbitas inundações com picos de descarga elevados, produzidos por severas tempestades, geralmente em uma área de extensão limitada.
<i>Flash flood</i>	Georgakakos (1986)	Operacionalmente, inundações bruscas são de ocorrência curta e requerem a emissão de alertas pelos centros locais de previsão e aviso.
<i>Flash flood</i>	Kömüsçü et al. (1998)	Inundações bruscas são normalmente produzidas por intensas tempestades convectivas, numa área muito limitada, que causam rápido escoamento e provocam danos enquanto durar a chuva.
Inundação Brusca ou Enxurrada	Castro (2003)	São provocadas por chuvas intensas e concentradas em regiões de relevo acidentado, caracterizando-se por súbitas e violentas elevações dos caudais, que se escoam de forma rápida e intensa.
<i>Flash flood</i>	Kron (2002)	Inundações bruscas geralmente ocorrem em pequenas áreas, durando apenas algumas horas (às vezes, minutos) das chuvas, com grande potencial de destruição. Elas são produzidas por intensas chuvas sobre uma pequena área.

Fonte: Goerl e Kobiyama (2005).

Outra característica definida e distintiva das "*flash floods*" é a identificação dos locais e ambientes mais suscetíveis à ocorrência desse tipo de evento. Posto isso, Zanchetta e Coulibaty

(2020), identificaram quatro categorias de áreas, urbanas ou não, propensas a serem afetadas por uma cheia desse nível. Essas categorias são ilustradas na Figura 1.

Figura 1 - Diferentes tipos de ambientes propensos a inundações.



Fonte: Zanchetta e Coulibaty (2020).

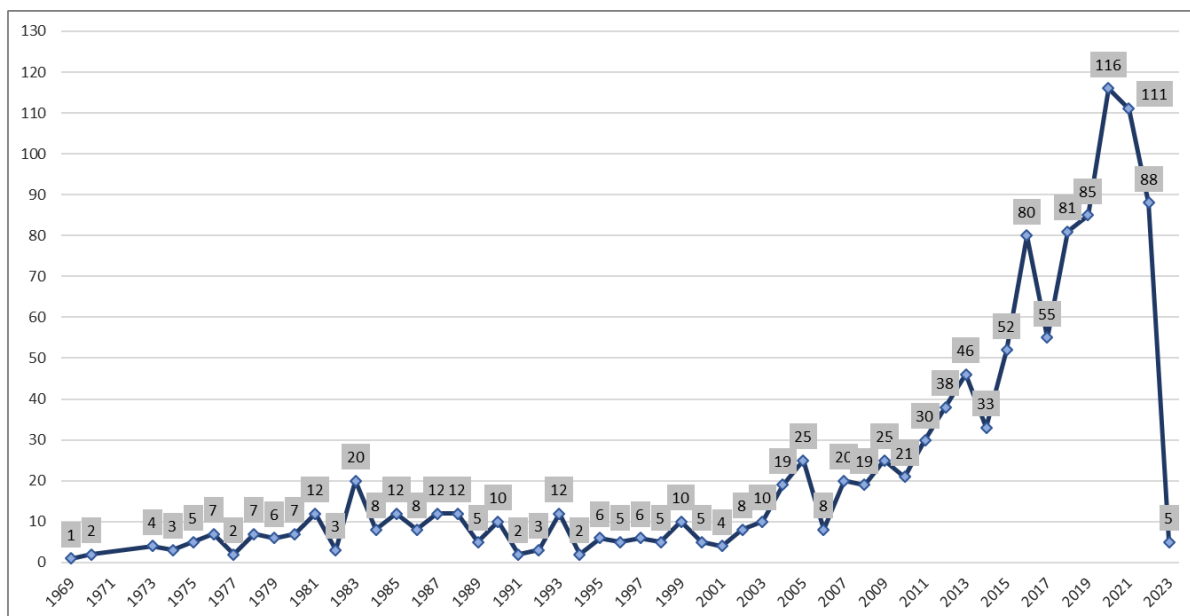
Sendo:

- a) As bacias hidrográficas íngremes não urbanizadas
- b) A zona urbana atendida pelo canal de drenagem central
- c) A zona urbana não ribeirinhas ao canal de drenagem
- d) Por fim, as zonas urbanas costeiras ao córrego, rio, canal e outros.

O poder destrutivo das inundações, aliado a alta velocidade e imprevisibilidade, traduzem suas consequências devastadoras às populações que, em muito dos casos, são surpreendidas. Posto isto, Ribeiro et al. (2020) relataram os danos e perdas sociais resultantes desse tipo de ocorrência em um município da Mata Sul de Pernambuco, onde a infraestrutura local foi amplamente afetada.

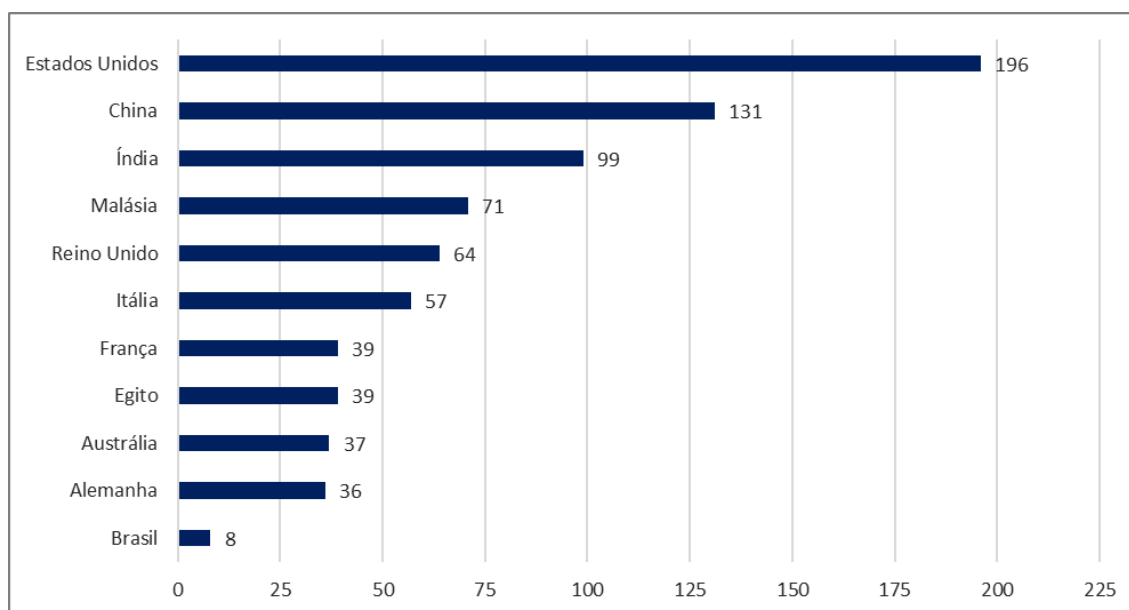
A pesquisa sobre o tema das “Flash Floods” não é recente e, com o objetivo de compreender melhor a evolução dos estudos relacionados a esse tópico, realizou-se uma análise do histórico por ano e dos países com maior desenvolvimento de pesquisas nesse domínio de conhecimento, por meio da pesquisa na base de dados "Scopus". Os resultados dessa análise são apresentados nos Gráficos (1) e (2).

Gráfico 1 - Distribuição das pesquisas e documentos, por ano, sobre o tema "*Flash Floods*" na área da Engenharia.



Fonte: A Autora (2022).

Gráfico 2 - Pesquisas sobre "*Flash Floods*", por países/território.



Fonte: A Autora (2022).

O aumento de pesquisas publicadas e disponibilizadas na base de dados “Scopus” mostra que, a partir de 1969, houve um crescimento nesse campo. No entanto, foi a partir de 2009 que os números começam a subir de forma mais significativa, ultrapassando 20 publicações ao ano e chegando a 100 documentos em 2021. Ao examinar a análise por

países/territórios, foram identificados os 10 primeiros países em termos de elaboração de trabalhos na área. O Brasil ocupa a 33ª colocação com 8 documentos publicados no âmbito da engenharia, com foco para as “*Flash Floods*”.

Em seguida, são apresentados alguns artigos relacionados ao tema e suas abordagens, incluindo os avanços recentes no que diz respeito à previsão de inundações repentinas. Esse tópico foi explorado por Zanchetta e Coulibaty (2020), que compilaram em uma revisão bibliográfica os estudos feitos sobre o tema.

No contexto das inundações repentinas, Boithias et al. (2017) conduziram um estudo para avaliar a capacidade do modelo hidrológico SWAT na simulação com módulos sub-diários com descargas contínuas, comparando-o com o modelo hidrológico MARINE. A avaliação foi realizada na bacia do rio Mediterrâneo, na França, entre 2006 e 2014. Os resultados revelaram que tanto os modelos SWAT quanto MARINE foram igualmente satisfatórios na reprodução das vazões de pico, considerando tanto tempo quanto volume, embora tenham encontrado limitações nos dados de chuva e nas características do solo. Portanto, concluíram que o modelo SWAT demonstrou ser uma ferramenta confiável para prever vazões em grandes bacias suscetíveis a inundações.

Li et al. (2018) também utilizaram a modelagem sub-diária, empregando o modelo SWAT e comparando-o com o modelo chinês Xin'anjiang (XAJ), amplamente utilizado para previsão de inundações. O estudo visou avaliar o desempenho dos modelos na bacia de Qilijie, sudeste da China. Os resultados demonstraram que ambos os modelos tiveram um desempenho satisfatório na simulação de inundações baseadas em eventos, com proporções qualificadas semelhantes. O modelo XAJ mostrou um desempenho superior em termos de erro relativo do escoamento superficial (RRE), enquanto o modelo SWAT apresentou melhor reprodução das vazões médias e altas. As métricas de desempenho, incluindo R^2 , NSE e PBIAS, variaram para cada modelo e evento.

As áreas montanhosas, em particular, estão propensas à ocorrência de cheias rápidas e devastadoras. Diante disso, Yuan et al. (2019) utilizaram a modelagem hidrológica, através do modelo HEC-HMS, para simular o processo de escoamento da chuva, visando determinar indicadores de alerta precoce de desastres relacionados à precipitação, analisando as chuvas críticas. Ao fim, eles puderam chegar a resultados que mostram o impacto dos diferentes padrões de precipitação e discorrem sobre estratégias capazes de auxiliar no alerta de inundações repentinas nas regiões montanhosas.

No Estado de Pernambuco, apesar dos eventos de seca característicos, as inundações têm devastado cidades ao longo dos anos. Lima Neto et al. (2020) analisaram duas situações

notáveis na região, ocorridas em 2011 e 2017. A avaliação foi conduzida mediante modelagem hidrológica e hidrodinâmica, utilizando dados de entrada sub-diários dos eventos na bacia do rio Una para os anos supracitados. Para a análise hidrológica, o modelo HEC-HMS foi empregado, com auxílio do método Snyder UH para transformar a precipitação em escoamento. A avaliação hidrodinâmica foi realizada pelo HEC-RAS, com simulações 1D e 2D utilizando um MDT de alta resolução. Após a calibração e validação dos modelos, os resultados constatarem consistência, com eficiência na modelagem horária e sub-horária. Entretanto, no que diz respeito aos produtos da modelagem hidrodinâmica, os resultados foram satisfatórios apenas com os modelos 2D.

2.2 EVENTOS DE CHEIAS

Essa seção destina-se a abordar as cheias ocorridas em todo o território brasileiro, com destaque nos eventos marcantes ocorridos no estado de Pernambuco. A variabilidade e as mudanças climáticas alteram o padrão de chuva ao longo dos anos, provocando flutuações nos níveis de água dos rios e nas vazões. Esse fenômeno intensifica a necessidade de infraestruturas hídricas para contenção da água, tornando os ecossistemas naturais mais vulneráveis a transbordamentos (Gomes, 2019).

Analisar os fenômenos que se desenrolaram ao longo dos anos equivale a um esforço de extrair o máximo aprendizado possível do passado. No entanto, é inevitável que determinados eventos e informações se dissolvam com o decurso do tempo, caindo no esquecimento. De acordo com Fanta *et al.* (2020), as inundações ocasionam um afastamento das margens dos rios, com uma preferência por áreas distantes e elevadas. Contudo, a passagem dos anos e a desapareição das marcas físicas tendem a atrair novamente a população para as regiões ribeirinhas, acarretando um aumento dos riscos envolvidos.

Em todo o território brasileiro, alguns eventos de cheias se destacam devido à sua capacidade de causar destruição em larga escala. Na região sul do país, mais especificamente no Rio Grande do Sul, um evento marcante ocorreu em 1941, afetando a cidade de Porto Alegre e sua região metropolitana. Este evento resultou em cerca de 15 mil moradias inundadas e 70 mil pessoas desabrigadas (Da Silveira *et al.*, 2023). No contexto de cheias bruscas, desencadeadas por eventos extremos de precipitação, destaca-se, ainda no Rio Grande do Sul, o evento com o ocorrido em janeiro de 2010 na porção central do estado, com 79 municípios relatando danos sofridos (Oliveira, 2023).

No estado de Santa Catarina, as enchentes e inundações têm sido um tema marcante e estudado ao longo dos anos. A inundação de 1974 na bacia do rio Tubarão teve efeitos catastróficos, com o número de afetados e vidas perdidas ainda não totalmente esclarecido (Vanelli *et al.*, 2023). A bacia do Rio Itajaí também experimentou eventos severos, com destaque para as cheias de julho de 1983 e novembro de 2008, que causaram danos substanciais (Pinheiro & Severo, 2023). Em dezembro de 2020, outro evento significativo foi registrado no Alto Vale do Itajaí (Schwarz *et al.*, 2023).

No final de 2021, chuvas intensas causaram devastação nos estados da Bahia e Minas Gerais. As perdas atingiram cerca de 3,1 bilhões de dólares, resultando em perdas de vidas e afetando aproximadamente 500 mil pessoas (Marengo *et al.*, 2023).

No estado de Pernambuco, inúmeros eventos de enchentes foram registrados desde 1632, quando ocorreu a primeira enchente registrada. Alguns eventos tiveram grande impacto, destruindo casas, causando fatalidades e deixando uma trilha de destruição. Outros eventos foram de menor escala, com danos mais limitados. Em julho de 1975, ocorreu o evento mais devastador do século passado na região do Recife.

O ano de 2010 é lembrado pelo registro da maior enchente na bacia do Rio Una, que afetou cidades em Pernambuco e Alagoas. As cidades mais afetadas foram Barreiros e Palmares (Fotografia 1). Na bacia do rio Mundaú, que se estende para o estado de Alagoas, a enchente de grande magnitude teve um impacto significativo, especialmente nas cidades do estado vizinho.

Fotografia 1 - Praça Ismael Gouveia, em Palmares, em junho de 2010.



Fonte: Wendel (2020).

No estado, ocorreram diversos eventos de enxurradas e inundações nos meses de maio de 2022 (Fotografia 2). A Região Metropolitana do Recife foi a mais impactada, com um trágico registro de mais de 120 mortes. Além disso, em junho e julho, as regiões de Mata Sul e Agreste do estado também sofreram as consequências desses eventos, afetando mais de 10 municípios.

Fotografia 2 - Desastre causado pelas fortes chuvas no bairro de Jardim Monte Verde em 2022.



Fonte: Fabio Nóbrega para a Folha de Pernambuco (2022).

Diante do que foi exposto, é fundamental assegurar a mitigação dos danos provenientes desses tipos de desastres. Posto isto, Goerl *et al.* (2012) enfatizam que medidas mitigadoras e preventivas constituem alternativas empregadas para atenuar os impactos causados por desastres hidrológicos.

De acordo com Tucci (2007), medidas estruturais e não estruturais podem ser utilizadas como subsídio à redução do dano causado por inundações. No âmbito das medidas estruturais, destacam-se barragens, diques de retenção, canais de desvio, bem como alargamento e aprofundamento do leito do rio. Por outro lado, entre as ferramentas não estruturais empregadas, incluem-se técnicas de simulação hidrológica e hidrodinâmica, mapeamento de áreas suscetíveis a inundações, sistemas de alerta, planejamento e gestão de enchentes (Pastel & Dholakia, 2010).

É certo que a implementação de técnicas mitigadoras e preventivas exige substancial investimento financeiro. Destarte, uma análise criteriosa da estratégia a ser adotada e das condições ambientais do local de estudo revela-se fundamental para atingir minimização mais eficaz e eficiente do desastre ambiental (BINNS, 2020).

Ao ponderar entre as duas alternativas, é possível identificar que o uso de ferramentas não estruturais é, por vezes, mais viável do ponto de vista financeiro para a prevenção de inundações (Monte *et al.*, 2016). Conforme ressaltado por Lima Neto (2019), a incorporação de métodos não estruturais é indispensável na previsão dos eventos de inundação. Desse modo, o uso de modelagem hidrológica se destaca como uma das ferramentas amplamente empregadas para essa finalidade.

2.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA

No contexto da pesquisa de Rennó & Soares (2000), um modelo pode ser descrito como uma simplificação da realidade que auxilia na compreensão de vários processos, sendo cada vez mais empregado em estudos ambientais e na análise de fenômenos ambientais. Uma classe de modelos muito relevantes nesse cenário são os hidrológicos.

Com o objetivo de representar de maneira mais precisa a parte terrestre do ciclo da água, os modelos hidrológicos avaliam a precipitação que incide sobre uma bacia hidrográfica e a modificam por meio de parâmetros físicos, gerando um fluxo representativo em uma seção específica de um rio. Além da análise da precipitação, vários outros processos são considerados, como evapotranspiração, infiltração, percolação, interceptação vegetal, balanço hídrico nas camadas superficiais e mais profundas do solo, bem como os diversos tipos de escoamento, tanto superficial quanto subsuperficial e subterrâneo em rios, canais e lagos (Tucci, 2010).

Tucci (2005) destaca que um modelo hidrológico é, portanto, uma ferramenta que procura representar os processos físicos e hidrológicos ocorrentes em uma bacia hidrográfica, sendo amplamente empregado para prever as consequências das suas ocorrências. No mais, o autor ainda destaca que a relação entre chuva e vazão é o processo mais comumente investigado.

Ademais, de acordo com Almeida e Serra (2017), os modelos hidrológicos são de extrema importância para compreender, prever e quantificar os fenômenos físicos naturais de um corpo hídrico. Estruturam-se, dessa forma, como recursos essenciais para determinar diversos parâmetros e informações, a fim de auxiliar em um bom planejamento e gestão dos recursos hídricos (Sahu; Shwetha; Dwarakish, 2023).

Os modelos hidrológicos podem ser empregados para diversos propósitos. Segundo Kaiser (2006), esses modelos podem prever vazões, auxiliando no gerenciamento de barragens e sistemas de alerta de inundações, bem como analisar o impacto de obras hidráulicas no curso

dos rios e as consequências das ações humanas sobre a bacia hidrográfica e seu impacto na formação do escoamento.

Simular com precisão o processo de escoamento da chuva e compreender seu comportamento ao longo de uma bacia hidrográfica constitui o objetivo central e um desafio primordial para hidrólogos e estudiosos da área. Na busca por respostas para essa questão, têm sido desenvolvidos ao longo dos anos diversos modelos hidrológicos com diferentes níveis de complexidade, resolução espacial, representação de processos e outras características (Cirilo *et al.*, 2020).

Apesar de todos os avanços registrados ao longo dos anos sobre a modelagem hidrológica, autores ainda buscam aperfeiçoar as técnicas e métodos. Destarte, Cirilo *et al.* (2020) apresentam um modelo hidrológico intitulado CAWM IV (*Campus Agreste Watershed Model*), que será detalhado posteriormente. Em termos práticos, os autores aplicaram o modelo para quatro bacias hidrográficas do estado de Pernambuco na intenção de demonstrar sua eficácia, e os resultados mostraram um desempenho bom para 55% a 92% dos eventos analisados.

Os modelos hidrológicos podem ser classificados por diferentes aspectos. Segundo Lucas *et al.*, (2009) e Rennó & Soares (2000) essa classificação pode ser feita consoante a natureza das variáveis temporais de entrada utilizadas, o que dá origem a modelos estocásticos ou determinísticos; pode também depender do tipo de relação entre as variáveis (equacionamento), resultando em modelos empíricos ou conceituais; a forma de seleção dos eventos, levando a modelos discretos ou contínuos; a presença ou ausência de relação espacial entre as variáveis, gerando os modelos pontuais ou distribuídos; e a dependência temporal das características da região de estudo, definindo os modelos como estáticos ou dinâmicos.

Muitos são os modelos existentes que podem ser aplicados para representar de maneira satisfatória uma bacia hidrográfica. Entretanto, dependendo dos dados de entrada e dos eventos a serem analisados, é necessário um refinamento e seleção de modelos que possuam a capacidade de simular eventos em escala sub-diária. Conforme Li & DeLiberty (2020), embora os modelos hidrológicos diários sejam amplamente utilizados, eles não são capazes de reproduzir os impactos das inundações repentinas ou eventos de magnitude rápida, onde em poucas horas de o pico de vazão recua. Portanto, os modelos sub-diários demonstram-se mais críticos e refinados para capturar tais eventos.

No âmbito das simulações sub-diárias, existem diversos modelos desenvolvidos e utilizados em diferentes regiões do mundo. Os modelos *Campus Agreste Watershed Model* versão 4 e 5 (CAWM IV e V), e o *Modèle du Génie Rural à 4 paramètres Horaires* (GR4H)

utilizados nesta pesquisa, são modelos concentrados do tipo chuva-vazão, com poucos parâmetros utilizados em seus processos de calibração. O Modelo CAWM se destaca como o objetivo central do estudo para o aprimorar sua versão sub-diária.

Outro modelo amplamente utilizado é o modelo hidrológico HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System*), vinculado ao Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE – *United States Army Corps of Engineers*). Modelo físico e conceitualmente semi-distribuído, é capaz de simular processos de chuva e escoamento em diversas áreas geográficas (Tassew *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2019; Yuan *et al.*, 2019; Lima Neto *et al.*, 2020).

Trata-se de um modelo que requer um número reduzido de dados de entrada e produz resultados satisfatórios (Ramesh, 2017). Sua aplicabilidade é variada, sendo destacado pelo Corpo de Engenheiros para estudos relacionados a inundações urbanas, análise de frequência de cheias, mitigação de perdas e planejamento de sistemas de alerta de enchentes, assim como para projetos de reservatórios e questões ambientais (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2008).

Com capacidade de simular eventos de curta e longa duração, o modelo é bastante utilizado em estudos hidrológicos (Sok & Oeurng, 2016), bem como em modelagem de vazão e previsão de cheias (Guduru *et al.* 2022), e na análise das descargas de estruturas de drenagem na Etiópia (Hirpessa AND Hailu, 2019).

O modelo semi-distribuído SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) também é aplicável em uma escala de tempo sub-horária para simular eventos, como demonstrado por Jeong *et al.* (2010) no Texas, além de outras pesquisas (Maharjan *et al.*, 2013; Boithias *et al.*, 2017; Yu *et al.*, 2018; Brighenti *et al.*, 2019). Na região da China merecem destaque as aplicações do modelo Xin'anjiang (XAJ), que tem sido utilizado para auxiliar na previsão de inundações (Li *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2022).

2.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA – CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL – CAWM

Tendo como premissa a simplicidade e os poucos parâmetros a serem calibrados, o CAWM – *Campus Agreste Watershed Model* é um modelo hidrológico concentrado, desenvolvido na Universidade Federal de Pernambuco. O modelo visa simular o escoamento superficial em bacias hidrográficas de regiões semiáridas (Gomes, 2019; Ferraz, 2019; Cirilo *et al.*, 2020; Cirilo, 2022).

Nesse modelo a evapotranspiração é comparada com precipitação: se houver precipitação suficiente, toda a evapotranspiração é atendida e descontada. Caso contrário, toda a precipitação é considerada como evapotranspiração direta (E_d) e registra-se uma parcela não atendida (E_n), que poderá ser total ou parcialmente retirada do reservatório do solo (S). (Gomes, 2019; Ferraz, 2019; Cirilo *et al*, 2020; Cirilo, 2022).

O excesso de precipitação, quando ela é maior que a evapotranspiração, é denominado precipitação efetiva (P_n). Nas equações a seguir está mais bem representada essa relação entre precipitação e evapotranspiração:

$$\text{Se } P \geq E, \quad \text{então } P_n = P - E \quad (1)$$

$$\text{Se } P \leq E, \quad \text{então } P = E_d \text{ e } E_n = E - E_d \quad (2)$$

Essa precipitação efetiva é dividida em três parcelas, sendo a primeira referente à recarga do solo (P_s), baseada no conceito apresentado por Edijatno and Michel (1989), dada por:

$$P_s = \frac{S \cdot \left(1 - \left(\frac{S_t}{S}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{S}\right)}{1 + \frac{S_t}{S} \tanh\left(\frac{P_n}{S}\right)} \quad (3)$$

onde S_t é a acumulação de água no solo ao longo do tempo e S é a capacidade máxima de retenção de água, sendo assim, S representa o valor máximo do S_t . No CAWM IV o parâmetro S passa a ser variável de decisão ou pode ser estimado a partir do Curve Number médio da área em estudo.

A segunda parte é a determinação da evapotranspiração complementar (E_s), extraída das camadas mais superficiais do solo e limitada pelo valor da evapotranspiração não atendida E_n . A magnitude do seu valor depende do valor atribuído ao parâmetro α , como demonstrado na Equação 4. Este parâmetro foi introduzido devido às incertezas presentes na estimativa da evapotranspiração, inclusive pelo fato de que as condições de solo, cobertura vegetal e clima são variáveis no território de uma bacia.

$$E_s = \left(1 - e^{-\frac{\alpha \cdot S_t}{S}}\right) \cdot E_n \quad (4)$$

O terceiro componente da precipitação efetiva P_n , representa o escoamento superficial direto para a calha fluvial F_d ;

$$F_d = P_n - P_s - E_s \quad (5)$$

sendo, F_d , escoamento superficial direto (mm), P_n a precipitação efetiva (mm), P_s a recarga do solo (mm) e E_s a evapotranspiração complementar (mm).

A partir do reservatório da lâmina de água S_t armazenada no solo ocorre o fluxo sub-superficial F_s que percola em direção ao reservatório da calha dos rios R , conforme a equação:

$$F_s = K_s \times S_t \quad (6)$$

onde K_s é o parâmetro a ser calibrado e representa a permeabilidade do solo, e F_s representa a percolação através do reservatório R .

Acrescenta-se os fluxos F_d e F_s ao volume de água armazenada na calha fluvial. O escoamento na calha fluvial F_r é admitido como uma função não-linear do volume armazenado R , de acordo com a Equação 7, sendo b uma constante determinada a seguir e K , referente ao escoamento superficial e um parâmetro que depende de características da bacia.

$$F_r = K * R^b \quad (7)$$

A expressão para cálculo do parâmetro K foi desenvolvida como uma forma de regionalizar o parâmetro dentro de uma mesma bacia, por sub-bacias com áreas e extensões de rio fracionadas, bem como avaliar os valores do parâmetro em situações em que o passo de tempo Δt seja alterado. O desenvolvimento da expressão é esclarecido a seguir.

Considerando que o volume do reservatório da calha fluvial (V_{sup}) pode ser representado pela capacidade do conjunto de rios que compõem a bacia com extensão total L_t e a área de seção equivalente A_e , tem-se a Equação 8:

$$V_{sup} = A_e * L_t \quad (8)$$

Nos modelos hidrológicos os volumes de água são representados em milímetros por unidade de área da bacia hidrográfica, essa em Km². Destarte, a acumulação **R** é dada por:

$$R = \frac{V_{sup}}{c \cdot A_b} = \frac{A_e \cdot L_T}{c \cdot A_b} \quad (9)$$

Com $c = 1000$, uma constante utilizada para compatibilizar as unidades utilizadas.

Considerando o escoamento na calha equacionado pela Fórmula de Manning com as simplificações de seção retangular de largura equivalente **B_e**, trecho de extensão **L_T** e declividade **S₀**, assim como raio hidráulico **R_h** aproximadamente igual à lâmina escoada **y**, encontra-se a equação a seguir:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A_e \cdot R_h^{2/3} \cdot S_0^{1/2} \cong \frac{1}{n} \cdot \frac{A_e^{5/3}}{B_e^{2/3}} S_0^{1/2} \quad (10)$$

Onde, $A_e = B_e \cdot y$ e $R_h \cong y$

Considerando $V = A_e \cdot L$ o volume de água acumulado num trecho de rio com comprimento **L_T**, a seguinte relação pode ser obtida:

$$Q = \frac{S_0^{1/2}}{n \cdot L^{5/3} \cdot B_e^{2/3}} V^{5/3} = K * V^{5/3} \quad (11)$$

Por similaridade, a Equação 11 sugere $b = 5/3$ quando se compara com a Equação 7. A relação entre a vazão (m³/s) e a lâmina escoada (mm) é dada por:

$$Q = \frac{F_r \cdot c \cdot A_b}{\Delta t} \quad (12)$$

onde **Δt** é o passo de tempo em segundos. Combinando a Equação (12) com o último termo da Equação (10), tem-se:

$$\frac{F_r \cdot c \cdot A_b}{\Delta t} = \frac{1}{n} \cdot \frac{A_e^{5/3}}{B_e^{2/3}} S_0^{1/2} \quad (13)$$

Explicitando a área equivalente na Equação 9, chega-se na Equação 14 e substituindo na Equação 13, tem-se a Equação 15:

$$A_e = \frac{c \cdot A_b \cdot R}{L_T} \quad (14)$$

$$\frac{F_r \cdot c \cdot A_b}{\Delta t} = \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{c \cdot A_b \cdot R}{L_T} \right)^{5/3} \frac{S_0^{1/2}}{B_e^{2/3}} \quad (15)$$

Com $b = 5/3$ e substituindo-se a Equação 7 e 9 na Equação 15 e isolando o termo **K**, chega-se à expressão final:

$$K = \frac{\Delta t}{n} \cdot \left(\frac{c^2 \cdot A_b^2}{B_e^2 \cdot L_T^5} \right)^{1/3} S_0^{1/2} \quad (16)$$

Sendo assim, o parâmetro **K** é calculado de acordo com as características da bacia e estas informações podem ser obtidas a partir de técnicas de geoprocessamento utilizando o modelo digital do terreno.

A relação não linear $F_r = K \cdot R^b$ indicada na Equação (7) 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. Os resultados de cálculo do parâmetro *K* têm sido avaliados para diferentes bacias, com simulações em passo de tempo diário.

As perdas de água no sistema podem ser devidas a diversas causas: volumes de retenção nas depressões do solo e pela vegetação, gradativamente evaporados; volumes de extravasamento que não retornam à calha fluvial, igualmente evaporados; infiltração nas fendas do embasamento cristalino. Essa perda é extraída do escoamento superficial direto. Utiliza-se para cálculo das perdas a expressão:

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

O expoente **p** tem sido testado nas diversas simulações desenvolvidas variando de 0,9 a 1,2. Na maior parte dos casos o valor 1 mostra-se mais adequado, sendo o “default” do modelo:

somente em áreas de grandes extravasamentos valor maior tem-se mostrado mais adequado. K_L é um parâmetro a calibrar do modelo.

Os parâmetros a calibrar do modelo CAWM IV são, portanto, K_s , K_L e eventualmente S . O parâmetro K tem-se mostrado adequado para variação entre 0,001 e 0,07, com valor de referência de 0,025. No caso de rios com declividades acentuadas o valor calculado a partir da Equação 16 geralmente é mais elevado. Caso isso aconteça, recomenda-se excluir os trechos mais abruptos do curso do rio no cálculo da declividade. No outro extremo, em bacias muito grandes o comprimento total da rede de rios L_r pode levar a valores de K bem abaixo da faixa de valores que leva a melhores resultados. Nas situações em que o valor do parâmetro sai da faixa de valores recomendados tem-se utilizado $K = 0,025$.

O parâmetro S é estimado como sendo igual à capacidade de retenção de água no solo, calculada a partir do Curve Number médio da bacia CN :

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (18)$$

Para cálculo de CN tem sido utilizado mapeamentos de solos da EMBRAPA e imagens de satélite classificadas do uso e ocupação do solo nas bacias. Um “plugin” foi desenvolvido para isso, incorporado ao software QGIS.

2.4.2 CAWM V

O modelo CAWM V procura contemplar os processos de fluxo nas bacias hidrográficas de rios perenes, em regiões de solos mais profundos que permitam a manutenção das vazões de base nos períodos de estiagem. Para isso, a principal mudança em relação à versão CAWM IV é a inserção de um reservatório subterrâneo que passa a ser alimentado quando o reservatório do solo atinge a saturação (Figura 3). Daí em diante inicia-se um fluxo de percolação profunda P_g para alimentar o reservatório de águas subterrâneas, crescendo a lâmina acumulada G . Dele sai o fluxo F_g que alimenta o rio, complementando as parcelas F_d e F_s :

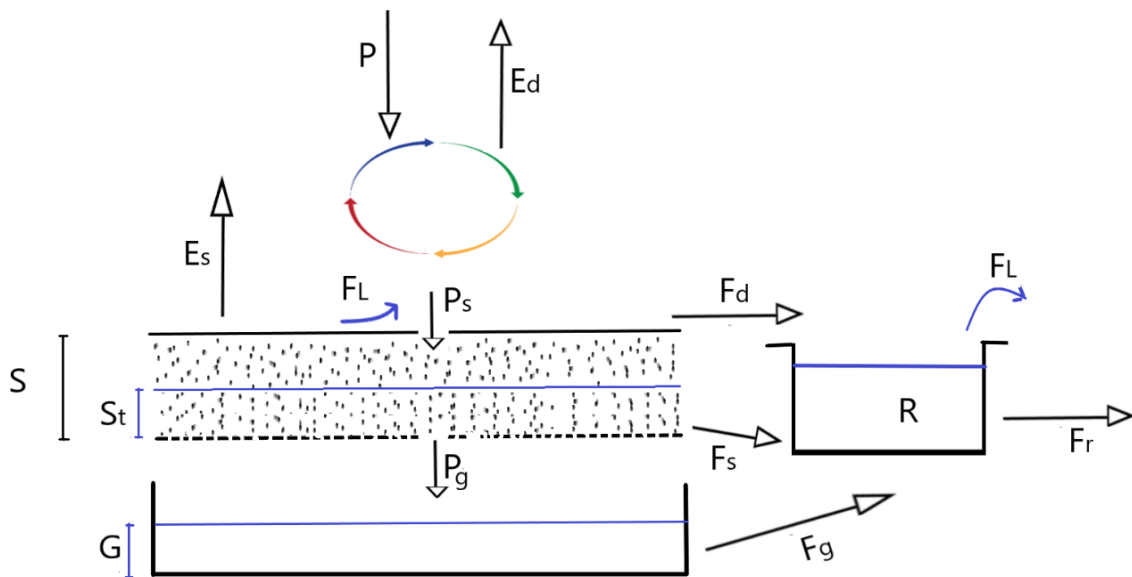
$$F_g = K_g \cdot G \quad (19)$$

sendo K_g um parâmetro de transferência de água no solo a calibrar, similar a K_s . Para permitir a alimentação do reservatório subterrâneo, a fórmula de cálculo da percolação P_s foi modificada para:

$$P_s = P_n \cdot \left(1 - \frac{S_t}{\beta \cdot S}\right) \quad (20)$$

Sempre que S_t atinge o valor de S ($S_t \leq \beta \cdot S$), o excedente passa a compor a percolação profunda P_g . O modelo CAWM V, portanto, tem 3 parâmetros básicos a calibrar.

Figura 3 - Esquema do modelo CAWM V.



Fonte: Cirilo (2022).

Análise mais recente, resultante de aplicação dos modelos CAWM IV e CAWM V a um conjunto de 250 bacias hidrográficas brasileiras com áreas compreendidas entre 300 e 800.000 km² estabeleceram relação para estimativa do parâmetro K a partir da área da bacia (Cirilo, 2022). Também permitem calcular o parâmetro K_L a partir do balanço hídrico global na bacia, e assim o mesmo deixa de ser calibrado.

$$K = 34,343 \cdot A^{-0,853} \quad (21)$$

$$k_L = \frac{\sum perdas_i}{\sum perdas_i + \sum vaz medida_i} \quad (22)$$

Sendo,

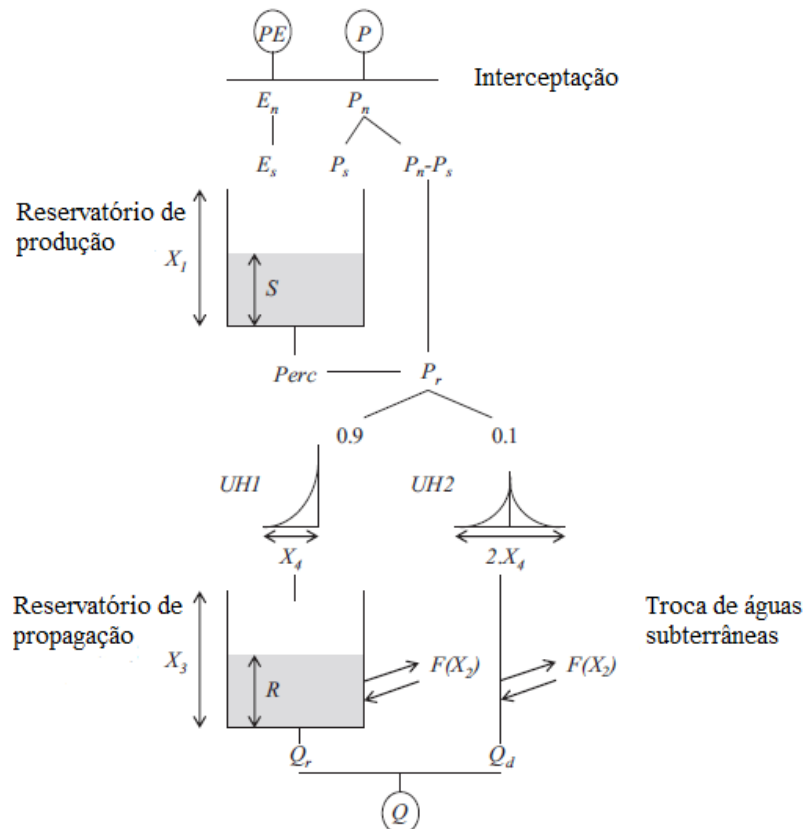
$$\sum perdas_i = \sum Precipitação_i - \sum Evapotrans real_i - \sum Vaz medida_i \quad (23)$$

2.5 MODÈLE DU GÉNIE RURAL À 4 PARAMÈTRES HORAIRES – (GR4H).

O modelo GR4H (*Modèle du Génie Rural à 4 paramètres Horaires*) é uma variante do modelo GR4J (*Modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier*) desenvolvido por Perrin, Michel e Andréassian (2003), operando em escala de tempo horária (Figura 4). Trata-se de um modelo chuva-vazão concentrado conceitual e possui apenas quatro parâmetros aperfeiçoáveis na fase de calibração:

- (i) X1 - a capacidade máxima de produção (mm);
- (ii) X2 - o coeficiente de troca de água da bacia (mm dia-1);
- (iii) X3 - a capacidade máxima de um dia para o reservatório de roteamento (mm);
- (iv) X4 - a base de tempo do hidrograma (horas).

Figura 4 - Estrutura do modelo GR4H.



Fonte: Perrin *et al.* (2003).

O modelo requer a precipitação (P) e evapotranspiração potencial (E ou PE) como dados de entrada, bem como a vazão (Q) e os parâmetros R e S que correspondem, respectivamente, aos níveis nos reservatórios de distribuição e produção (Perrin *et al.* 2003). Em seguida, são realizadas operações matemáticas em reservatórios hipotéticos que simulam o efeito das variáveis do ciclo hidrológico na bacia hidrográfica conforme mostrado a seguir.

A primeira operação realizada pelo modelo é a subtração de P por E objetivando determinar uma chuva “líquida” P_n ou uma capacidade evapotranspiração líquida E_n que são calculadas pelas seguintes condições:

$$P \geq E, \text{ então } P_n = P - E \text{ e } E_n = 0 \quad (24)$$

$$P < E, \text{ então } P_n = 0 \text{ e } E_n = E - P \quad (25)$$

Em contrapartida, se P_n for diferente de zero, uma fração P_s de P_n vai para o reservatório de produção e é determinado em função do nível S conforme equação abaixo:

$$P_s = \frac{x_1 \left(1 - \left(\frac{S}{x_1}\right)^2 \tanh\left(\frac{P_n}{x_1}\right)\right)}{1 + \frac{S}{x_1} \tanh\left(\frac{P_n}{x_1}\right)} \quad (26)$$

Onde x_1 (mm) é a capacidade máxima do armazenamento.

Já para o caso em que E_n não seja zero, uma taxa de evaporação real é determinada em função do nível no estoque de produção, calculando assim o E_s que irá para o reservatório. É obtido por:

$$E_s = \frac{S \left(2 - \frac{S}{x_1}\right) \tanh\left(\frac{E_n}{x_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{x_1}\right) \tanh\left(\frac{E_n}{x_1}\right)} \quad (27)$$

Sendo assim, o teor de água armazenada no reservatório de produção é determinado por:

$$S = S - E_s + P_s \quad (28)$$

A percolação Perc, do reservatório de produção é então calculada conforme equação 26:

$$Perc = S \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4}{9} \frac{S}{x_1} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} \quad (29)$$

Portanto, se o Perc é sempre menor que S, logo:

$$S = S - Perc \quad (30)$$

Por fim, a quantidade total P_r de água que chega às funções de roteamento, ou seja, água que chega ao reservatório de distribuição do modelo é dada por:

$$P_r = Perc + (P_n - P_s) \quad (31)$$

Sendo o P_r dividido em dois componentes de fluxo, onde: 90% do P_r é roteado por um hidrograma unitário UH1 e, em seguida, um armazenamento de roteamento não linear, e os 10% restantes do P_r são roteados por um hidrograma unitário UH2. Onde ambos os hidrogramas depende do parâmetro x_4 , ou seja, do tempo.

Com isso chega ao cálculo da troca de água de captação no solo F que atua em ambos os componentes do fluxo e é calculado com:

$$F = x_2 \left(\frac{R}{x_3} \right)^{7/2} \quad (32)$$

Com R sendo o nível no armazenamento de roteamento, x_3 sua capacidade de 'referência' e x_2 o coeficiente de troca de água. Onde, x_2 pode ser positivo no caso de importação de água, negativo para exportação de água ou zero quando não há troca de água.

Embora seja bastante semelhante e tenha as equações derivadas do modelo *modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier* (GR4J), foram necessários alguns ajustes nas formulações baseados em experimentação empírica para a transformação para o passo de tempo horário, como descrito no pelos autores Bennett *et al.* (2014). As modificações expostas na literatura são:

1) Coeficiente de percolação:

$$Perc = S \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{1}{C_{Perc}} \frac{S}{x_1} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} \quad (33)$$

Onde O C_{Perc} é o um coeficiente de percolação adimensional que no GR4H passa a ser $C_{Perc} = 4$ que na versão anterior do GR4J era $C_{Perc} = 9/4$, mostrado por Mathevet *et al.* (2004), que simularam melhor para o passo de tempo horário.

Como um valor elevado de C_{Perc} reduz a percolação do reservatório de produção com o tempo é necessário o ajuste para impedir que o modelo drene as reservas de umidade do solo muito rapidamente, permitindo simular vazões baixas. (Bennett *et al.*, 2014).

2) Troca de água, coeficiente de roteamento (adimensional):

$$F = x_2 \left(\frac{1}{C_r} \frac{R}{x_3} \right)^{7/2} \quad (34)$$

Onde antes o $C_r = 1$ e passa a ser $C_r = 24^{\frac{1}{4}} = 2.21$ no GR4H. Sendo necessário para reduzir a vazão de saída do armazenamento de roteamento. O C_r também é ajustado nas demais equações que ele está inserido.

3) Curvas dos hidrogramas unitários, UH1 e UH2

$$SH1(t) = \begin{cases} 0 & : t \leq 0 \\ \left(\frac{t}{x_4} \right)^\alpha & : 0 < t \leq x_4 \\ 1 & : t \geq x_4 \end{cases} \quad (35)$$

$$SH2(t) = \begin{cases} 0 & : t \leq 0 \\ \left(\frac{t}{x_4} \right)^\alpha & : 0 < t \leq x_4 \\ \frac{1}{2} 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{x_4} \right)^\alpha & : x_4 < t < 2x_4 \\ 1 & : t \geq 2x_4 \end{cases} \quad (36)$$

Onde α , expoente do hidrograma unitário, passa a ser no GR4H, $\alpha = \frac{5}{4}$, que antes era $\alpha = \frac{5}{2}$ no GR4J. O menor α em GR4H tem o efeito de atenuar os hidrogramas unitários – achatando-os e suavizando-os (Mathevet *et al.* 2004).

Além disso o presente estudo foi seguido os valores de referência adotado por Ayzel e Heistermann (2021) no seu estudo realizado para identificar os efeitos dos comprimentos dos dados na calibração, realizada através da otimização do NSE no solver do Excel, do utilizando o modelo hidrológico GR4H como uma das ferramentas. Os parâmetros x_1 , x_2 , x_3 e x_4 foram então adotados e utilizados seguindo a Tabela 1, e são utilizados como restrições no solver para otimizar.

Tabela 1 - Faixa de valores para os parâmetros do modelo GR4H.

Parâmetro	Faixa de Calibração
X_1	$0,1 \leq x_1 \leq 1500$
X_2	$-10 \leq x_2 \leq 10$
X_3	$0,1 \leq x_3 \leq 500$
X_4	$0,5 \leq x_4 \leq 24$

Fonte: A Autora (2022).²

² Nota: Adaptada de Ayzel e Heistermann (2021)

2.6 INDICADORES DE PERFORMANCE UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

Para ambos os modelos, CAWM IV e CAWM V, os indicadores utilizados para analisar a qualidade da simulação no processo de calibração são:

- R^2 : coeficiente de determinação, variando de 0 a 1, com os valores mais próximos de 1 indicando menor variação do erro e correlação boa.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - \overline{Q_{i,obs}})(Q_{i,cal} - \overline{Q_{i,cal}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - \overline{Q_{i,obs}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{i,cal} - \overline{Q_{i,cal}})^2}} \right] \quad (37)$$

- NSE : Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, um dos mais utilizados em modelos hidrológicos, e suas derivações NSE_{logQ} e NSE_{sqrtQ} ;

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - Q_{i,cal})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (38)$$

$$NSE_{sqrtQ} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{i,obs}} - \sqrt{Q_{i,cal}})^2}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{i,obs}} - \sqrt{\overline{Q_{obs}}})^2} \quad (39)$$

$$NSE_{logQ} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log Q_{i,obs} - \log Q_{i,cal})^2}{\sum_{i=1}^n (\log Q_{i,obs} - \log \overline{Q_{obs}})^2} \quad (40)$$

- $RMSE$: raiz do erro médio quadrático, utilizado para medir as performances das modelagens;

$$RMSE = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - Q_{i,cal})^2 \right]^{1/2} \quad (41)$$

- *Pbias%*: erro percentual médio, analisa as tendências dos valores em serem subestimados e superestimados, com valores negativos e positivos, respectivamente (Yapo, Gupta, Sorooshian, 1996).

$$Pbias = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{cal}(i) - Q_{obs}(i))}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i))} 100 \right]$$

(42)

- *RSR*: razão entre *RMSE* e desvio padrão:

$$RSR = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - Q_{i,cal})^2 \right]^{1/2}}{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \right]^{1/2}}$$

(43)

onde *n* é o número de dados do evento, *Q_{i,obs}* é a vazão observada, *Q_{i,cal}* a vazão calculada e $\overline{Q_{obs}}$ a média observada no período.

No modelo GR4H os indicadores de performance na calibração e validação são o NSE – Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe e suas derivações *NSE_{logQ}* e *NSE_{sqrQ}*; e o *Pbias*, percentual de tendência.

Gotschalk e Motovilov (2000, apud Van Liew *et al.*, 2007) classificaram como muito bons os valores de NSE acima de 0.75 e satisfatórios os valores entre 0.75 e 0.36, tanto para vazões diárias como mensais. Outros autores consideram aceitáveis somente os valores iguais ou superiores a 0,5. Essas referências podem ser consideradas também para as derivações de NSE. Moriasi *et al.* (2007) recomendaram as faixas de valores para NSE, *Pbias* e *RSR* indicadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Indicadores de performance recomendados na literatura.

	NSE	Pbias %	RSR
Muito bons	0,75-1,00	< ±10	0-0,5
Bons	0,65-0,75	±10 - ±15	0,5-0,6
Satisfatórios	0,50-0,65	±15 - ±25	0,6-0,7
Não satisfatórios	<0,5	>±25	>0,7

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

A literatura sobre os indicadores de performance NSE é variada, mas em suma os valores altos de NSE indicam melhores ajustes das vazões altas, o NSEsqrtQ representa as formas para o comportamento das vazões intermediárias e o NSElogQ as vazões baixas (Traore *et al.*, 2014).

2.7 BASES DE DADOS ESPACIAIS

Um elemento real pode ser representado de duas formas no formato digital em um Sistema de Informações Geográficas (SIG), o formato vetorial e a representação raster. A representação raster consiste em um “espaço representado por elementos separados e distintos, que não estão em continuidade com a vizinhança, segmento em células em um arranjo ordenado de linhas e colunas” (Ribeiro *et al.*, 2006). Existem diversas formas para obtenção de dados matriciais (raster), incluindo a captura de fotografias aéreas e imagens de satélite.

Na maioria dos modelos hidrológicos avançados e atualizados, bases de dados espaciais são utilizadas para fornecer informações descritivas do sistema físico. Isso se aplica, por exemplo, a modelos como o HEC-HMS e o Campus Agreste Watershed Model (CAWM). Neste trabalho em particular, os Modelos Digitais de Terreno (MDT) e mapas de cobertura do solo, obtidos através dos processamentos do software Qgis, são necessários para definição de parâmetros de entrada dos modelos hidrológicos aqui utilizados, assim como para a captura as redes de drenagem das sub-bacias, informações sobre declividade, comprimento das redes de fluviais, áreas e pontos de localização de imagens do local.

2.7.1 Projeto Pernambuco Tridimensional – PE3D

O Pernambuco Tridimensional (PE3D) é um projeto realizado e administrado pela Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos do Governo de Pernambuco e suas sucessoras, que visa mapear todo o território estadual através de levantamento aerofotogramétrico digital e mapeamento a laser do relevo.

O PE3D teve seus primórdios logo após a enchente catastrófica que destruiu cidades de Pernambuco e Alagoas em 2010. Durante a operação do comitê de crise instalado pelo governo estadual, equipe da ANA – Agência Nacional de Águas apresentou ao proponente, então um dos responsáveis pela gestão dos recursos hídricos em Pernambuco, a possibilidade de utilização de tecnologia de varredura a laser para identificação do relevo como uma forma

rápida e precisa de realizar os levantamentos topográficos necessários à implantação de obras de contenção de cheia, reconstrução e replanejamento das cidades destruídas. O trabalho foi realizado e subsidiou de forma rápida o desenvolvimento de projetos de barragens, ampliação e reordenamento de calha fluvial, ações de desocupação e revitalização de margens no perímetro urbano, estudos e pesquisas sobre riscos e ações necessárias para minimização dos efeitos das inundações.

Concluído o protótipo do levantamento a laser para 1100 km² ao longo de três rios onde os transbordamentos foram mais acentuados em 2010, veio a iniciativa de expandir o levantamento para todos os 98500 km² do território estadual. Esse trabalho, concluído em dezembro de 2016, deu origem ao Programa Pernambuco Tridimensional, única base territorial de alta resolução a laser gerada em estado da América Latina. Os serviços contratados visaram o recobrimento aerofotogramétrico e perfilamento a laser de todo o território pernambucano. O estado foi subdividido em 13.125 folhas articuladas. Para cada uma das articulações foi elaborado um conjunto de produtos gerados por meio de recobrimento aerofotogramétrico na escala 1:5.000 e outro a partir de varredura a laser utilizando a tecnologia LiDAR. A partir do recobrimento aerofotogramétrico foram geradas ortofotos na escala 1:5000, com resolução espacial de 50cm, assim como fotoíndices e seus respectivos metadados. Para o perfilamento a laser, os produtos são Imagens de Intensidade Hipsométrica, Modelos Digitais de Elevação e de Terreno nos formatos de arquivo texto com as coordenadas “x,y,z” de cada ponto, bem como no formato Geotiff, padrão usual para esse tipo de produto. A densidade de pontos cotados é de aproximadamente 3 pontos a cada 4m². A base de dados gerada contém cotas para aproximadamente 75 bilhões de pontos do território pernambucano (Cirilo, 2022).

Adicionalmente, as áreas urbanas das sedes de 41 municípios foram mapeadas na escala 1:1000. Essas áreas urbanas totalizam área aproximada de 870 km² e a resolução espacial das ortofotos é da ordem de 12cm. Para o perfilamento a laser destas cidades, o erro aceitável de altimetria foi inferior a 10cm, enquanto a densidade média do levantamento é de aproximadamente 4 pontos/m².

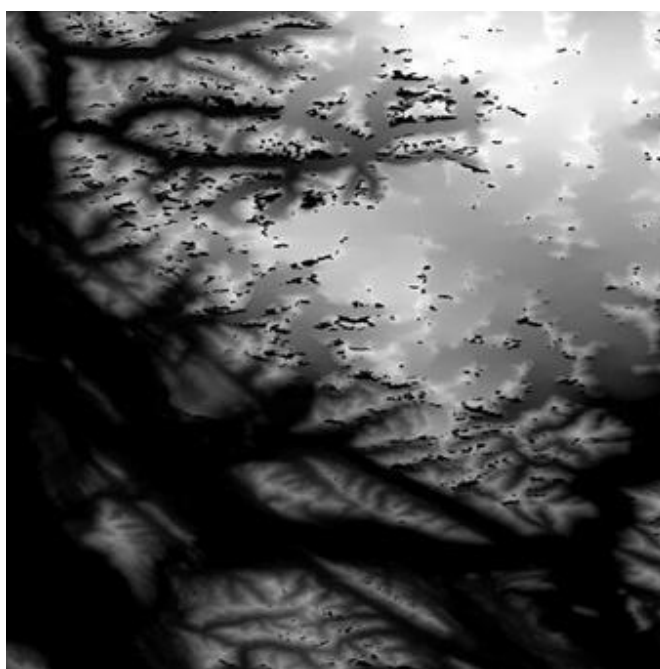
Pela qualidade da base de dados e a abrangência do levantamento, o PE3D tem sido utilizado na elaboração de estudos e projetos, mas também em muitos trabalhos de pesquisa. A modelagem hidrodinâmica particularmente tem ganho de qualidade com a melhor resolução do terreno (Ribeiro *et al.*, 2020; Oliveira *et al.*, 2019; Ribeiro Neto *et al.*, 2015; Dantas *et al.*, 2014). Para simulação hidrológica em áreas maiores o esforço computacional na geração dos elementos físicos é muito elevado, de modo que os pontos cotados são reamostrados para espaçamentos maiores (5m, por exemplo).

Os arquivos dos Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D) tiveram miscelânea elaborada pela APAC e se encontram disponíveis em arquivos no site oficial do programa, www.pe3d.pe.gov.br/, com produtos de modelo digital de elevação (MDE) e modelos digitais do terreno (MDT – 30m) e ortofotos.

2.7.2 Shuttle Radar Topography Mission – SRTM

A *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*, (Figura 5) é um projeto desenvolvido e responsabilidade da *National Imagery and Mapping Agency (NIMA)* e a *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*. Com a missão de produzir um banco de dados espaciais para todo o planeta, o radar realizou do período de 11 a 22 de fevereiro de 2000, 16 órbitas diárias na Terra a bordo de uma nave espacial *Endeavour* (EMBRAPA TERRITORIAL, 2022).

Figura 5 - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) não preenchido, Alaska.



Fonte: United States Geological Survey, 2018.

Com aproximadamente 80% da superfície terrestre mapeada com sucesso a coleta de dados foi realizada com o objetivo de elaborar um Modelo Digital de Elevação (MDE) das terras continentais (EMPRABA TERRITORIAL, 2022; UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2018)

O SRTM com resolução espacial de 30 m é um exemplo de representação raster de um modelo digital de elevação, que serve como base espacial global para todo o planeta a partir de dados disponibilizados pelo USGS – United States Geological Survey. Os arquivos estão disponíveis em, <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. As versões mais recentes do QGIS permitem que se faça o download direto da base de dados, por quadrículas. Aqui o SRTM 30m foi utilizado para a bacia do Mundaú, que compreende áreas fora do território Pernambucano.

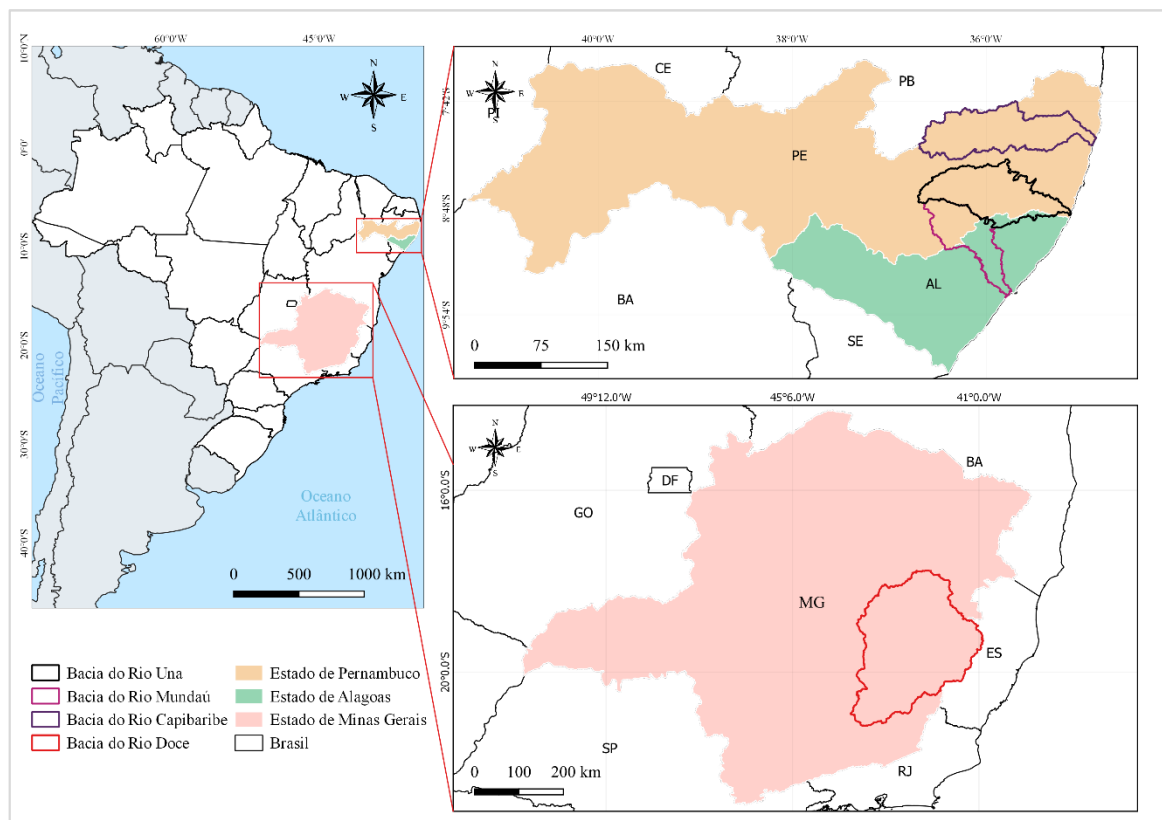
3 METODOLOGIA

Neste capítulo, inicialmente, é apresentada a caracterização da área de estudo. Em seguida, são definidos os materiais e métodos que serão empregados ao longo deste trabalho, visando o aprimoramento do modelo CAWM.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O desenvolvimento deste estudo concentra-se na análise de eventos de cheias em bacias hidrográficas localizadas no estado de Pernambuco e, eventualmente, em outras regiões do território nacional. Dentre as várias bacias em Pernambuco, destacam-se especialmente as dos rios Capibaribe, Mundaú, Una e também a bacia do Rio Doce, em Minas Gerais, escolhida pela disponibilidade de dados sub-diários. O mapa de localização dessas bacias é apresentado no Mapa 2.

Mapa 2 - Mapa de localização das bacias hidrográficas estudadas.



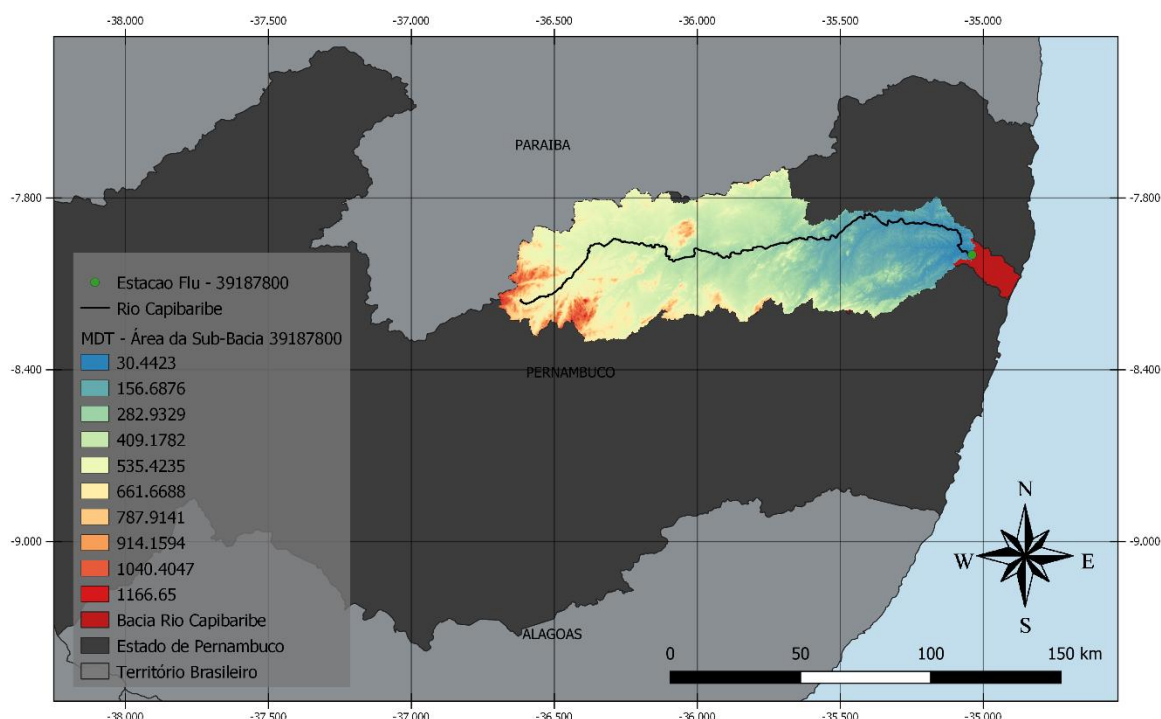
Fonte: A Autora (2023)

3.1.1 Localização e Generalidades

BACIA DO RIO CAPIBARIBE - A bacia hidrográfica do rio Capibaribe está localizada na parte norte-oriental do estado de Pernambuco, com latitude sul variando entre 07°41'20" e 08°19'30" e longitude oeste de 34°51'00" e 36°41'58", fazendo divisa com o estado da Paraíba no extremo norte e com outras bacias do estado. A bacia apresenta uma área de aproximadamente 7.454 km² e abrange 42 municípios, distribuídos entre as regiões do agreste central, agreste setentrional, mata sul, mata norte e região metropolitana do Recife, com o rio Capibaribe com o curso d'água principal da bacia, com nascente na divisa entre os municípios de Jataúba e Porção. (APAC, 2020a).

Para o escopo deste estudo, serão examinadas as características e dinâmicas de uma parcela da Bacia do Capibaribe. A sub-bacia selecionada abrange a área de contribuição do posto fluviométrico de código 39187800, pertencente à Agência Nacional de Águas (ANA), situado no município de São Lourenço da Mata, na região metropolitana do Recife, conforme ilustrado no Mapa 3. Além disso, o rio principal dessa sub-bacia é o rio Capibaribe, cujos detalhes são fornecidos na Tabela 3.

Mapa 3 - Área de contribuição até o posto telemétrico 39187800.



Fonte: A Autora (2023).

Tabela 3 - Características básicas da bacia hidrográfica do Rio Capibaribe.

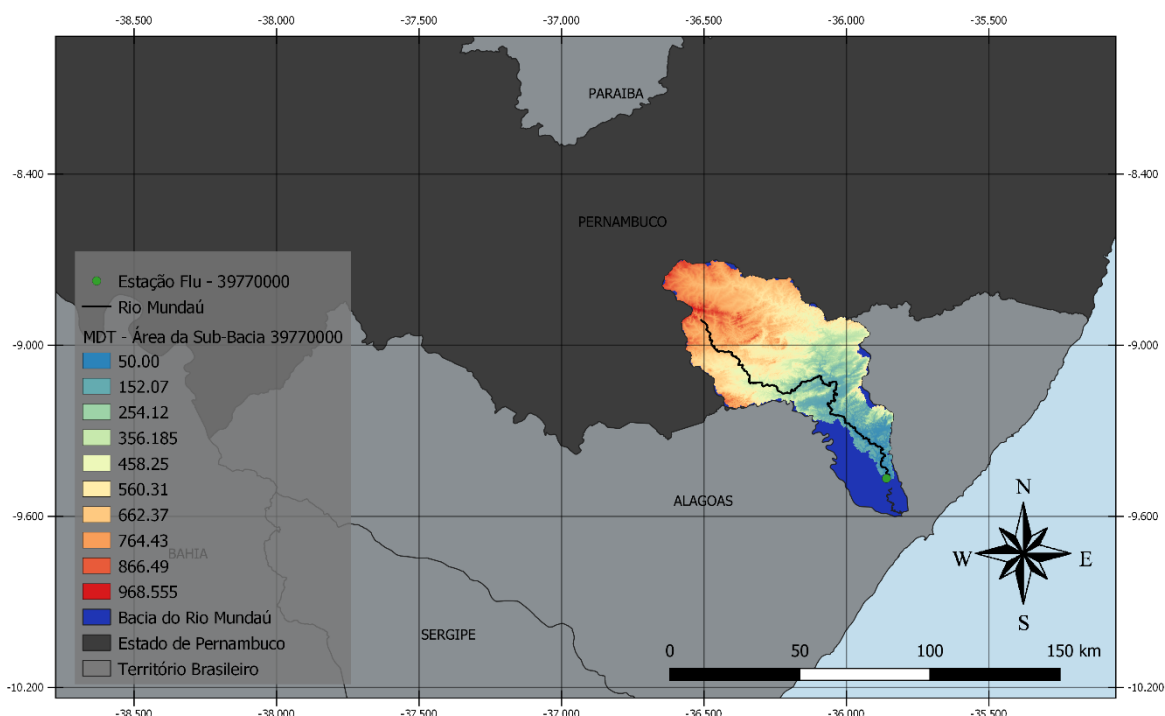
Bacia hidrográfica	Capibaribe – Posto 39187800
Área da bacia (km²)	7375
Comprimento total da drenagem (km)	8297
Declividade média dos rios (m/m)	0,0017

Fonte: A Autora (2023).

BACIA DO RIO MUNDAÚ - A bacia hidrográfica do Mundaú está localizada parte em território de Pernambuco, uma maior parcela, e parte no estado de Alagoas. A parte pernambucana, correspondendo à unidade de planejamento hídrico UP6, localiza-se entre as coordenadas 08° 41' 34" e 09° 14' 00" de latitude sul, e 36° 03' 36" e 36° 37' 27" de longitude oeste, limita-se ao norte com a bacia do rio Una (UP5), ao sul com o estado Alagoano e com um grupo de pequenas bacias GI1 (UP20), a Leste com a bacia do rio Una e com o estado de Alagoas e a Oeste com o grupo GI1 e com a bacia do rio Una. Possui uma área total de cerca de 4.090,39 km², onde aproximadamente 2.154 km² do todo está no estado de Pernambuco e abrange 15 municípios e com o rio Mundaú, principal curso de água, nascendo na cidade de Garanhuns (APAC, 2020b).

Neste estudo, são analisadas as características e comportamentos da sub-bacia definida pela área de contribuição do posto fluviométrico da Agência Nacional de Águas (ANA) de código 39770000, conhecido como "Fazenda Boa Fortuna", localizado no município de Rio Largo, conforme apresentado no Mapa 4. Além disso, o rio principal que percorre essa sub-bacia é o Mundaú, tendo a sua nascente situada no município de Garanhuns. Mais detalhes sobre a sub-bacia são fornecidos na Tabela 4.

Mapa 4 - Área de contribuição até o posto telemétrico 39770000.



Fonte: A Autora (2023).

Tabela 4 - Características básicas da bacia hidrográfica do Rio Mundaú.

Bacia hidrográfica	Mundaú – Posto 39770000
Área da bacia (km ²)	3592
Comprimento total da drenagem (km)	3786
Declividade média dos rios (m/m)	0,0019

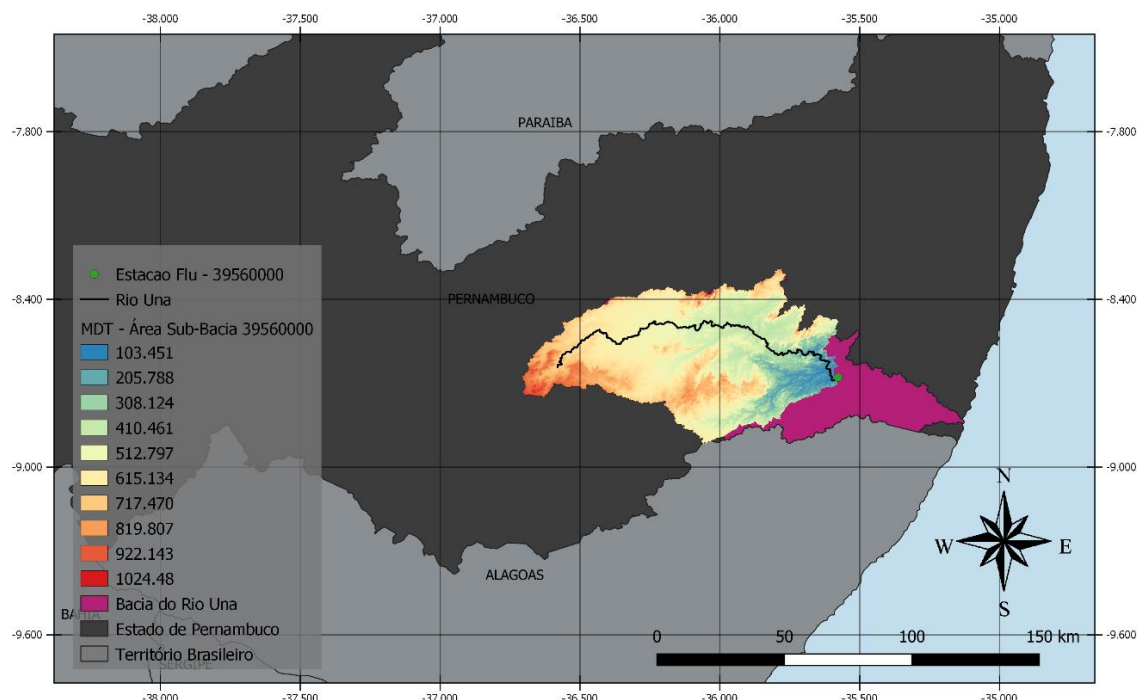
Fonte: A Autora (2023).

BACIA DO RIO UNA - A bacia do rio Una, unidade de planejamento hídrico UP5, possui como curso d'água principal o rio Una, com nascente no município de Capoeira, e compreende ao todo 42 municípios. Em coordenadas a bacia está entre 08°17'14" e 08°55'28" de latitude sul, e 35°07'48" e 36°42'10" de longitude oeste, na parte litoral sul do estado de Pernambuco e fazendo divisa ao norte, com as bacias dos rios Ipojuca (UP3) e Sirinhaém (UP4), e o grupo de bacias de pequenos rios litorâneos 4 – GL4 (UP17); ao sul, com a bacia do rio Mundaú (UP6), o Estado de Alagoas, o grupo de bacias de pequenos rios litorâneos 5 - GL5 (UP18) e o grupo de bacias de pequenos rios interiores 1 – GI1 (UP20); a leste, com o Oceano Atlântico, a bacia do rio Sirinhaém, o GL4 e GL5; e, a oeste, com as bacias dos rios Ipojuca e Ipanema (UP7). Ao todo a bacia apresenta uma área de 6.740 km², e assim como a bacia do rio

Mundaú ela também compreende dois estados, Pernambuco e Alagoas, e do todo 6.263 km² estão inseridos em Pernambuco (APAC, 2020d).

Este estudo tem como propósito analisar as características e comportamentos da sub-bacia delimitada pela área de contribuição do posto fluviométrico identificado pela Agência Nacional de Águas (ANA) com o código 39560000, nomeado como "Palmares" e situado no município de Palmares. A representação geográfica dessa sub-bacia pode ser visualizada no Mapa 5. O principal curso d'água que atravessa essa sub-bacia é o Rio Una, cujos detalhes estão apresentados na Tabela 5.

Mapa 5 - Área de contribuição até o posto telemétrico 39560000.



Fonte: A Autora (2023).

Tabela 5 - Características básicas da bacia hidrográfica do Rio Una.

Bacia hidrográfica	Una – Posto 39560000
Área da bacia (km ²)	4917
Comprimento total da drenagem (km)	5282
Declividade média dos rios (m/m)	0,0024

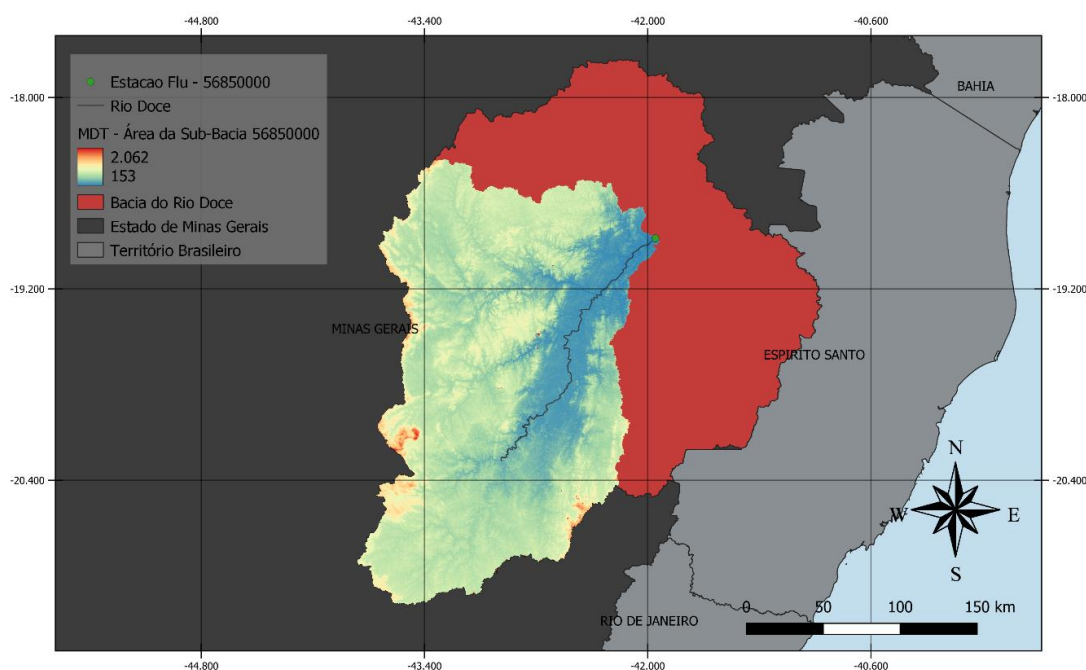
Fonte: A Autora (2023).

BACIA DO RIO DOCE – Cobrindo parte do território do Estado de Minas Gerais e Espírito Santo tem-se a bacia hidrográfica do rio Doce com uma área de drenagem de 86.715

km², sendo 86% no estado mineiro e 14% do território do Espírito Santo. O principal tributário é o rio Doce com uma extensão de 853 km, com nascentes em Minas Gerais, nas Serras da Mantiqueira e do Espinhaço, percorrendo um relevo montanhoso, acidentado e ondulado e precipitações médias anual variando de 900 a 1.500 mm. A bacia abrange 225 municípios, total ou parcialmente inseridos nela, sendo 200 mineiros e 25 capixabas. Assim com as bacias já mencionadas, a bacia do rio Doce também apresenta registros de enchentes marcantes como em 1979, 1997, 2011/2012, 2020, 2021, 2022 e com muita influência da ação antrópica (CBH-DOCE, 2023; CPRM, 2023).

Para este estudo, a sub-bacia delimitada pelo posto fluviométrico com o código 56850000 (denominado "Governador Valadares"), situado no município de igual nome, foi selecionada. O rio Doce é o curso d'água principal que percorre essa sub-bacia, como ilustrado no Mapa 6.

Mapa 6 – Área de contribuição até o posto telemétrico 56850000.



Fonte: A Autora (2023).

Tabela 6 - Características básicas da bacia hidrográfica do Rio Doce.

Bacia hidrográfica	Rio Doce – Posto 56850000
Área da bacia (km ²)	40424
Comprimento total da drenagem (km)	16061
Declividade média dos rios (m/m)	0,0186

Fonte: A Autora (2023).

3.2 DADOS HIDROLÓGICOS

Para a análise dos dados hidrológicos das bacias, tem sido essencial examinar as séries pluviométricas e fluviométricas que cobrem a área de estudo. Ambos os tipos de dados, registrados em intervalos sub-diários, têm sido adquiridos a partir de fontes específicas da ANA e da APAC. Além disso, os dados necessários para a evapotranspiração (Normais Climatológicas) são fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), de acordo com a área de estudo.

3.2.1 Dados Pluviométricos

Os dados hidrológicos utilizados neste trabalho foram coletados a partir das estações de medição equipadas com Plataformas de Coleta de Dados (PCDs). Essas estações, localizadas nas áreas de interesse, correspondem a postos telemétricos de precipitação. Para selecionar os postos apropriados, foram identificadas as estações telemétricas no mapa fornecido pela ANA. Para automatizar esse processo, foi desenvolvido um código em Python específico para este estudo. Esse código é capaz de coletar dados telemétricos a cada 15 minutos, incluindo informações sobre chuva, nível e vazão.

Uma vez selecionados os postos relevantes, o próximo passo envolveu o cálculo da chuva média para a bacia de interesse. Isso foi realizado por meio do método Inverse Distance Weighting (IDW), com o auxílio do software QGIS e das ferramentas macro do Excel.

É importante ressaltar que os dados telemétricos disponíveis frequentemente apresentam lacunas e falhas. Essas falhas podem ser corrigidas por meio de processos de preenchimento, levando em consideração as características das séries temporais e a qualidade dos dados disponíveis. O IDW foi utilizado para esse preenchimento de dados.

3.2.2 Dados Fluviométricos

No que diz respeito aos dados de vazão, os procedimentos seguem a mesma abordagem adotada para os dados de precipitação, com a diferença de que não é necessário calcular um valor médio. Além disso, quando se trata de dados falhos, como no caso da estação do Rio Capibaribe no ano de 2011, foram empregadas técnicas específicas. Nesse contexto, utilizou-se uma curva-chave, que consiste em utilizar os valores de cota e nível para calcular as vazões, ao mesmo tempo em que se realizou o preenchimento das lacunas nos dados através de

interpolação linear. A curva-chave utilizada foi fornecida pela Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC) e foi desenvolvida a partir de observações de eventos de cheias.

Os detalhes cadastrais das estações a partir das quais foram obtidos os dados de vazão utilizados no estudo podem ser encontrados na Tabela 7. Até o presente momento, essas estações constituem a fonte dos dados que sustentam a análise em questão.

Tabela 7 – Dados cadastrais das estações telemétricas consideradas.

	Estação	Corpo hídrico	Município	Latitude	Longitude
Capibaribe	39187800	Rio Capibaribe	São Lourenço da Mata	-7.9986	-35.0392
Mundaú	39770000	Rio Mundaú	Rio Largo/AL (Faz. Boa Fortuna)	-9.4672	-35.8597
Una	39560000	Rio Una	Palmares / PE	-8.6794	-35.5769
Rio Doce	56850000	Rio Doce	Governador Valadares/ MG	-18.8831	-41.9508

Fonte: A Autora (2023).

3.3 DADOS PE3D E SRTM

No âmbito da modelagem hidrológica e da delimitação das sub-bacias de interesse, torna-se imperativa a obtenção de informações acerca da topografia da área em questão. Para tal fim, o uso do Modelo Digital de Terreno (MDT) desempenha um papel fundamental, proporcionando uma representação remota e digital da superfície.

Neste estudo, optou-se por empregar o MDT proveniente do Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D), cujos dados estão disponíveis a uma resolução de 30 metros para as áreas completamente situadas dentro do território de Pernambuco. Para as áreas além dos limites desse território, ou seja, as bacias do Mundaú e do Rio Doce, recorreu-se ao MDT do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), também a uma resolução de 30 metros. O recorte específico do MDT para cada região foi realizado com base no sistema de coordenadas projetado UTM, ajustando-se ao respectivo fuso, que variou entre 23s e 25s.

O processamento e tratamento dos arquivos raster do MDT foram conduzidos por meio do software QGIS 3.10. Nesse processo, foram identificadas e corrigidas falhas na representação do terreno, seguido pela delimitação das sub-bacias e a criação da rede de drenagem, que alimentaria os modelos com informações sobre as características físicas das bacias em estudo.

As etapas desse processo foram executadas utilizando as seguintes ferramentas SIG:

1. Reprojeção do raster MDT para o sistema de coordenadas desejado;
2. Preenchimento de depressões no relevo para a correção de irregularidades (rfill.dlr ou fill sinks);
3. Geração de um raster contendo as delimitações das sub-bacias e a rede de drenagem (r.watershed);
4. Conversão do raster em um formato vetorial, resultando em um conjunto de vetores que representam os cursos d'água (r.to.vect);
5. Para a criação das áreas de interesse, empregou-se a ferramenta r.water.outlet, seguida da conversão do raster para o formato vetorial, conforme mencionado no item 4.

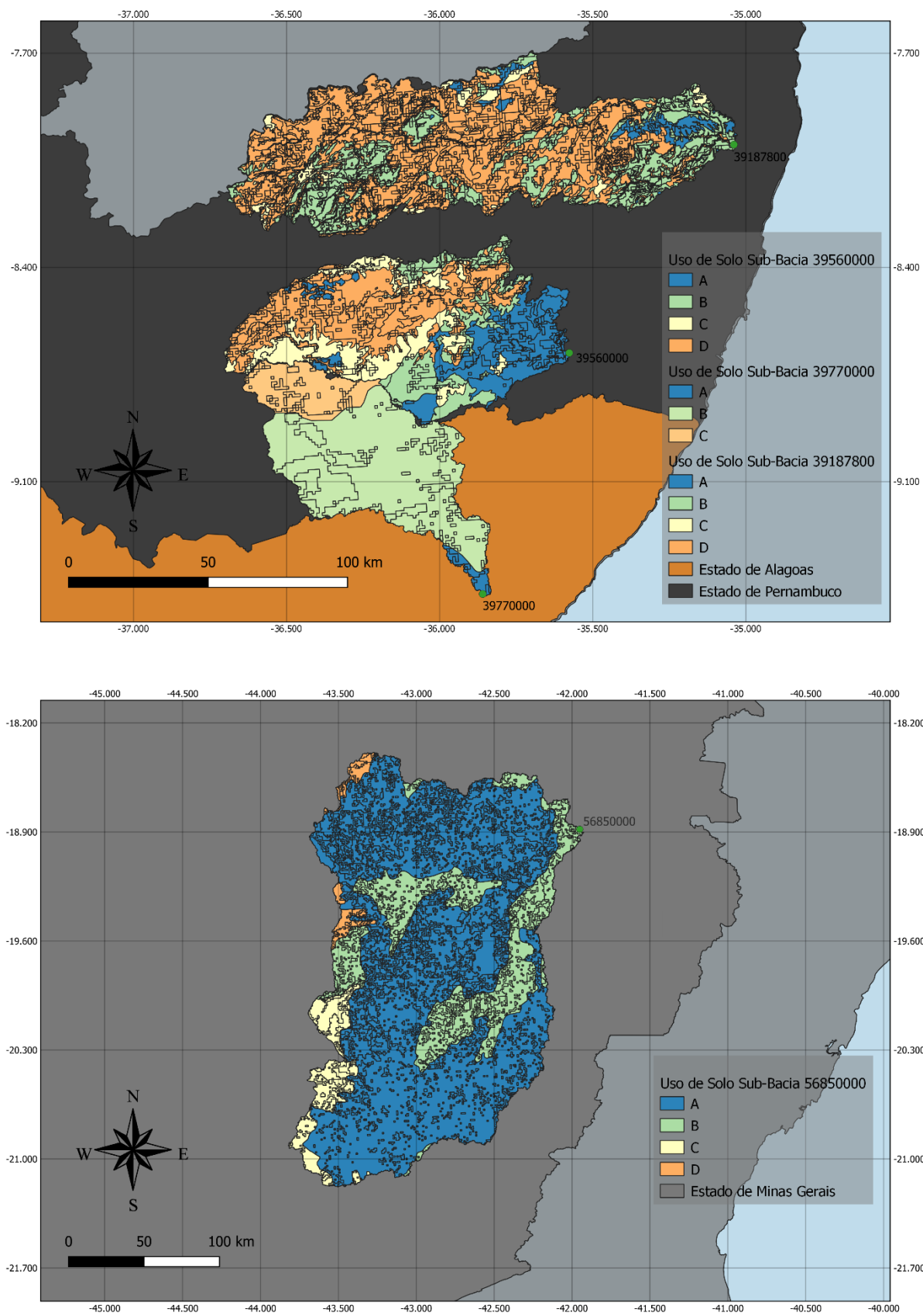
Essas etapas foram executadas em conformidade com as ferramentas e metodologias de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), contribuindo para a obtenção de um conjunto robusto de dados topográficos e hidrológicos essenciais para a modelagem e análise.

3.4 USO E OCUPAÇÃO DE SOLO

Um dos aspectos peculiares de uma bacia hidrográfica, com influência significativa no ciclo hidrológico, é a sua cobertura e uso do solo. No contexto do Modelo CAWM, um dos dados essenciais para a análise hidrológica é o cálculo da capacidade máxima de retenção do solo (parâmetro "S"), o qual é derivado do valor médio do Número de Curva (CN) correspondente à bacia.

Esse processo está condicionado aos mapas de uso e ocupação do solo das áreas de estudo, que foram obtidos a partir do mapeamento estadual e nacional desenvolvido pela EMBRAPA. Os recortes desses mapas para as quatro bacias sob análise estão representados no Mapa 7. Esses mapas proporcionam a identificação das diversas características de solo e os seus respectivos usos, tais como áreas de pastagem, corpos d'água, zonas urbanas e outras categorias. Adicionalmente, esses mapas também permitem a classificação dos solos da região conforme a taxonomia proposta por Sartori (2010), a qual categoriza os solos em classes A, B, C e D, que refletem as suas diferentes capacidades de infiltração. A classe A é associada aos solos mais arenosos, enquanto a classe D abrange os solos mais argilosos.

Mapa 7 - Mapa de Uso e Ocupação dos Solos.



Fonte: A Autora (2023).

3.5 MODELO CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL – CAWM

3.5.1 Adaptações para o Modelo Sub-diário

O modelo CAWM (Cirilo, 2022), disponível no site da UFPE por meio do link <<https://www.ufpe.br/web/grh>>, e previamente apresentado nos segmentos anteriores deste estudo, foi originalmente concebido para simulações com um intervalo de tempo diário. Neste trabalho, o modelo é adaptado para conduzir simulações sub-diário. A primeira aplicação no modelo reside no cálculo do coeficiente de escoamento superficial "K", o qual está intrinsecamente ligado às características da bacia. Nesse contexto, a sua formulação é diretamente influenciada pelo intervalo de tempo, como evidenciado na Equação 21.

$$K = \frac{\Delta t}{n} \cdot \left(\frac{c^2 \cdot A_b^2}{B_e^2 \cdot L_T^5} \right)^{1/3} S_0^{1/2} \quad (16)$$

- $\Delta t = 900$ s (15 minutos, padrão do intervalo de tempo dos registros da maioria das estações telemétricas de precipitação e níveis dos rios, a partir dos quais são calculadas as vazões).
- Os dados de evapotranspiração devem igualmente ser reorganizados para o intervalo de 15 min.

As alterações no modelo e principais foram nos parâmetros a calibrar, com modificações nos parâmetros base da versão CAWM diária e a inserção de dois novos parâmetros a calibrar no sistema, conforme elencado abaixo.

- Os parâmetros K_s , relacionado à permeabilidade do solo, K_a , relacionado à percolação no reservatório profundo, tornam-se um único parâmetro, ou seja, o parâmetro K_d passa a ser igualado ao K_s .
- Para os rios temporários, versão CAWM IV, o único parâmetro calibrado na nova versão é, portanto K_s , parâmetro relacionado à permeabilidade do solo.
- O parâmetro de infiltração (β) no solo é calibrado no sistema para os rios perenes, seguindo o esquema do CAWM V. O parâmetro de perdas (K_L) deve ser avaliado pelo balanço hídrico nas duas versões do CAWM.

- Inserção dos parâmetros de escoamento da calha, K , e do coeficiente do expoente das perdas na calha – p na calibração do sistema.

3.6 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

Os parâmetros calibrados no CAWM ainda dependem das versões utilizadas, seja IV ou V, o que implica em considerações distintas para bacias semiáridas e úmidas. Portanto, para as bacias em questão - Mundaú, Capibaribe, Una e Rio Doce - foram realizadas rodadas de calibração, com os resultados aqui apresentados levando em conta a localização das estações escolhidas. Nas aplicações fornecidas, o coeficiente de perda, K_L , permaneceu como um parâmetro calibrável, juntamente com o parâmetro de permeabilidade do solo, K_S .

No caso do modelo GR4H, que foi adaptado para simulações horárias a partir do GR4J (versão diária), foram seguidos os procedimentos padrões do modelo, incluindo os parâmetros e equações que estão descritos na literatura, conforme apresentado na seção 2.5.

Os períodos de análise foram definidos com base nos eventos de enxurradas e cheias ocorridos, bem como na disponibilidade dos dados de vazão e chuva. De maneira geral, as simulações e calibrações foram realizadas por evento, especialmente para os rios temporários, uma vez que durante a maior parte do tempo as vazões são nulas ou muito baixas. Esse cenário se aplicou às simulações dos eventos na sub-bacia do rio Capibaribe. No caso da Bacia do Mundaú essa análise também é possível, porém, para além do evento, incluso no período de calibração, o período de análise foi estendido para período de meses por se tratar de uma região mais úmida e com dados de vazão mais significativos.

Nas sub-bacias do Una e do Rio Doce, os períodos de análise variaram de alguns meses a validações de alguns dias, como no caso da bacia em Minas Gerais. Essa variação foi considerada para testar o comportamento dos modelos em diferentes cenários.

Portanto, os eventos calibrados e validados, dispostos na Tabela 8, correspondem a enxurradas ou cheias, caracterizadas pelo aumento dos níveis de vazão para patamares acima dos considerados normais, incluindo níveis de alerta e inundação, conforme definido pelas agências responsáveis pelo monitoramento, como a APAC (Agência Pernambucana de Águas e Clima) para as sub-bacias do Rio Capibaribe, Mundaú e Una, e a CPRM (Serviço Geológico do Brasil), que monitora o nível do Rio Doce por meio da plataforma SACE.

Tabela 8 - Períodos escolhidos de Calibração e Validação.

CAPIBARIBE			
Evento de Calibração – 2011		Evento de Calibração - 2022	
Evento – GR4H	Evento - CAWM	Evento – GR4H	Evento - CAWM
01/05/2011 00:00 a 19/05/2011 23:00	01/05/2011 00:00 a 19/05/2011 23:45	24/05/2022 00:00 a 01/06/2022 23:00	24/05/2022 00:00 a 01/06/2022 23:45
MUNDAÚ			
Período de Calibração – 2017		Período de Validação – 2020	
Evento – GR4H	Evento - CAWM	Evento – GR4H	Evento - CAWM
12/05/2017 00:00 a 04/10/2017 23:00	12/05/2017 00:00 a 04/10/2017 23:45	01/03/2020 00:00 a 30/09/2020 23:00	01/03/2020 00:00 a 30/09/2020 23:45
UNA			
Período de Calibração – 2017		Período de Validação – 2022	
Evento – GR4H	Evento - CAWM	Evento – GR4H	Evento - CAWM
01/05/2017 00:00 a 10/06/2017 23:00	01/05/2017 00:00 a 10/06/2017 23:45	01/04/2022 00:00 a 11/07/2022 00:00	01/04/2022 00:00 a 11/07/2022 00:00
RIO DOCE			
Período de Calibração – 2020		Período de Validação – 2023	
Evento – GR4H	Evento - CAWM	Evento – GR4H	Evento - CAWM
01/01/2020 00:00 a 25/03/2020 17:00	01/01/2020 00:00 a 25/03/2020 17:00	01/01/2023 00:00 a 16/01/2023 10:00	01/01/2023 00:00 a 16/01/2023 10:00

Fonte: A Autora (2023).

Os períodos selecionados para a bacia do Rio Capibaribe compreendem os eventos de enxurradas ocorridos em 2011, que resultaram em inundações em áreas da Capital - Recife - e em cidades da região metropolitana. Durante esse evento, a vazão ultrapassou 700 m³/s na estação de São Lourenço da Mata, caracterizando uma situação de alerta de inundação em 55 cidades. Esse evento ocorreu entre os dias 1º de maio e 6 de maio de 2011.

Outro evento escolhido ocorreu no ano de 2022, quando foi registrada uma situação de inundação em 28 de maio. No dia de pico desse evento, as vazões ultrapassaram 800 m³/s na estação de São Lourenço da Mata, que é a estação escolhida para esta análise. Esse evento foi responsável por uma catástrofe, considerada a mais significativa do século, com um trágico saldo de mais de 120 vidas perdidas, inúmeras pessoas desabrigadas e significativos danos materiais. Contudo, é importante ressaltar que a maior parte dos danos e fatalidades foi causada por deslizamentos de encostas decorrentes das chuvas intensas.

No caso dos eventos na sub-bacia do Rio Mundaú, a escolha foi pautada pela disponibilidade dos dados e pela análise de eventos - não necessariamente "*flash floods*", mas com vazões superiores aos níveis considerados de atenção para cheias, ou seja, 725 cm, e ao nível de alerta de cheias, que é de 860 cm, conforme os critérios definidos pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Alagoas (SEMARH, 2022). Nesse

contexto, os anos de 2017 e 2020 foram selecionados para o estudo, uma vez que nesses períodos ocorreram enchentes que resultaram em perdas de vidas e pessoas desabrigadas na região.

Os eventos nas sub-bacias do Una e do Rio Doce foram escolhidos seguindo os mesmos critérios das bacias mencionadas anteriormente. A análise incluiu a cota de inundação, os desastres ocorridos, informações veiculadas pela mídia e o intervalo de ocorrência como fatores determinantes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As modificações feitas para adequar o modelo CAWM para passo de tempo sub-diário, conforme mostrado no item 3.5.1, foram pensadas para realizar as rodadas de simulação e calibração para o passo de tempo de 15 minutos. As demais séries hidrológicas acompanharam esse intervalo de tempo.

Observe-se que nenhuma mudança foi feita na estrutura do modelo CAWM. Somente o parâmetro de escoamento superficial K , já dependente do intervalo de tempo Δt , é reavaliado para permanência de sua formulação ou se o mesmo deve passar a ser calibrável.

As modelagens hidrológicas apresentadas neste estudo têm como objetivo comparar os resultados obtidos pelos modelos CAWM e GR4H, visando a avaliação do desempenho de ambos.

As iterações do CAWM nessa versão sub-diária incorporam os parâmetros fundamentais da versão diária mencionados anteriormente, tais como K_S , K_d , K_L , e β , considerados variáveis a serem calibradas, com a ressalta de K_S e K_d serem considerados iguais na atual versão. O parâmetro K_L permanece passível de calibração devido à ausência de eventos de longa duração.

Os parâmetros K_S e K_L variam, de maneira geral, no intervalo de 0,0 e 1,0. O valor do parâmetro β tem seu valor calibrado variando entre 1,0 e 20,0 na análise do solver.

Os valores do coeficiente de escoamento K , calculados a partir da Eq. 21, não conduziram a resultados satisfatórios. Como resultado, foi observado que calibrar os valores tanto do coeficiente de escoamento na calha, K , quanto do coeficiente do expoente das perdas na calha, p , gerou melhorias no desempenho do modelo.

O valor padrão de K na versão diária varia entre 0,01 e 0,07, não sendo sujeito a calibração. No entanto, as iterações conduzidas com intervalos de 15 minutos utilizando essa faixa de valores de K não geraram os resultados desejados. Como consequência, procedeu-se ao teste e calibração de valores de K variando entre 0,0001 e 0,1, demonstrando uma maior adequação. Tal resultado era esperado, considerando a relação direta entre K e Δt , conforme evidenciado pelas Eq. 16 e Eq. 21.

Outra melhoria surgida no processo de ajuste do modelo CAWM foi a incorporação do expoente p como parâmetro passível de calibração. Esse expoente redistribui as perdas na bacia hidrográfica conforme ocorrem as cheias. Na versão diária ele é estimado, cabendo ao usuário escolher manualmente seu valor num intervalo de 0,9 a 1,2.

Neste estudo, a avaliação dos resultados se baseou na utilização das funções objetivas incorporadas nos modelos hidrológicos em análise. No que diz respeito ao modelo GR4H, a função objetivo permaneceu focada na maximização do coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NSE), uma medida amplamente reconhecida de desempenho.

No entanto, para o modelo CAWM sub-diário, foi realizada uma exploração abrangente de diferentes alternativas de funções objetivas. Os resultados mais promissores emergiram da maximização do NSE, juntamente com a consideração da relação NSE/MAE (onde MAE representa o desvio médio absoluto entre as vazões medidas e simuladas). Essa abordagem permitiu uma avaliação mais abrangente e precisa do desempenho do modelo CAWM sub-diário, fornecendo insights valiosos sobre sua capacidade de representar eventos de cheias.

No que se refere à metodologia de otimização, ambos os modelos foram submetidos ao método "GRG Não Linear" para a busca de soluções ótimas. Este método demonstrou consistentemente resultados satisfatórios, fornecendo uma base sólida para a análise comparativa dos modelos e ressaltando a confiabilidade dos resultados obtidos.

4.1 EVENTOS DA SUB-BACIA 39187800 – SÃO LOURENÇO DA MATA (CAPIBARIBE)

A bacia do Capibaribe tem histórico de eventos com grandes volumes de água, remontando a muitos anos. Um exemplo é a cheia de 1975, mencionada na seção 2.2, que resultou em 107 óbitos e milhares de desabrigados. Devido à ausência de registros telemétricos com dados de 15 minutos, esse evento não foi objeto de análise aqui.

Na busca por eventos de grande magnitude na Bacia do Capibaribe, foram identificados os acontecimentos de 2011 e 2022. Dado que apenas dois eventos estavam disponíveis, ambos foram utilizados para fins de calibração, posteriormente aplicando uma abordagem de validação cruzada. A simulação dos eventos foi conduzida conforme os períodos especificados na seção 3.7, resultando em achados relevantes para avaliar o desempenho dos modelos.

Os valores das métricas que avaliam a qualidade do ajuste dos modelos hidrológicos em relação aos dados observados durante o período de calibração estão registrados nas Tabelas 9 e 10. Essas tabelas representam os resultados das calibrações para os anos de 2011 e 2022, respectivamente, tanto para o modelo GR4H quanto para o modelo CAWM sub-diário.

Tabela 9 - Indicadores de desempenho para o evento 2011, sub-bacia 39187800.

Indicadores do Modelo CAWM sub-diário		Indicadores do Modelo GR4H	
	CAL – 2011		CAL – 2011
NSE	0,86	NSE	0,77
NSEsqrt	0,85	NSEsqrt	0,73
NSElog	0,80	NSElog	0,68
Pbias	1,13	Pbias	3,19
RSR	0,37	RSR	-
R²	0,86	R²	-

Fonte: A Autora (2023).

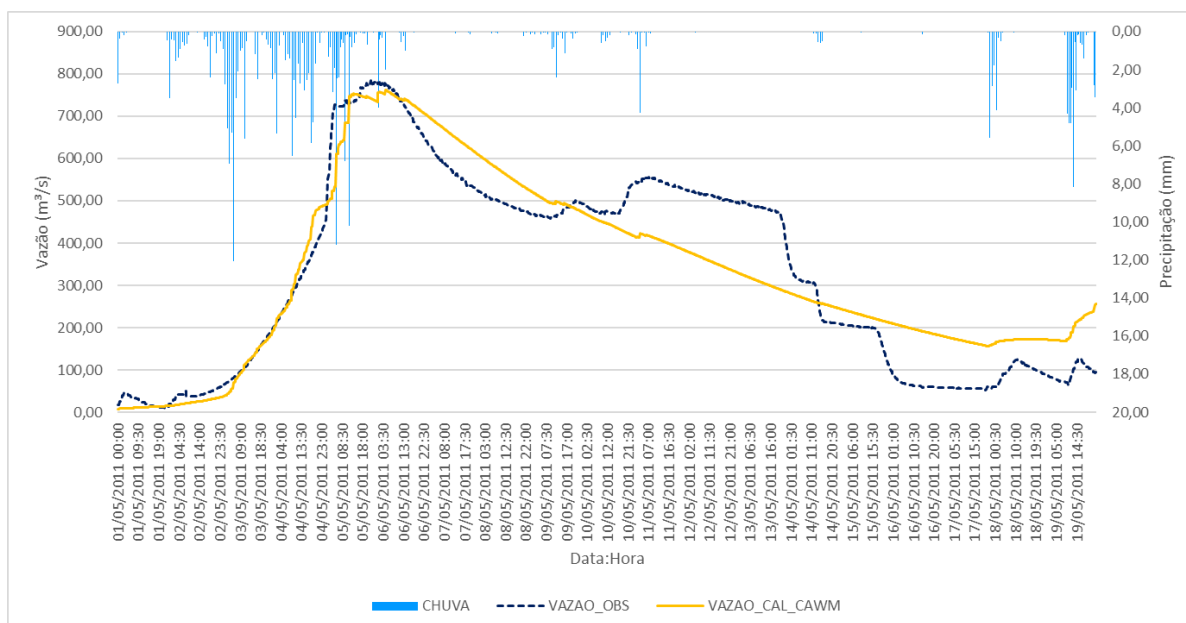
O índice de Nash-Sutcliffe obtido durante a fase de calibração do modelo CAWM sub-diário foi de 0,86 (eficiência muito boa), conforme a classificação de Moriasi et al. (2007). Por outro lado, em relação ao GR4H, o modelo apresentou um desempenho considerado muito bom, com um NSE de 0,77 na etapa de calibração. Quanto às variações NSEsqrt e NSElog, os resultados foram altamente satisfatórios para o modelo CAWM sub-diário e podem ser considerados bons para o GR4H, indicando que as vazões intermediárias e baixas foram bem ajustadas, com o CAWM sub-diário superando nesse aspecto.

O Percentual Pbias revelou-se muito bom no modelo CAWM sub-diário, com um valor de 1,13, segundo a classificação de Moriasi et al. (2007), e com uma tendência à superestimação dos valores, seguindo a abordagem de Yapo, Gupta e Sorooshian (1996). Da mesma forma, conforme a literatura mencionada, o evento de 2011 na sub-bacia 39187800, modelado pelo GR4H, apresentou uma tendência muito boa com valores superestimados.

Os indicadores RSR e R² não são aplicáveis ao modelo GR4H. No entanto, esses indicadores são relevantes para o CAWM sub-diário, e os valores obtidos para ambos foram considerados muito bons.

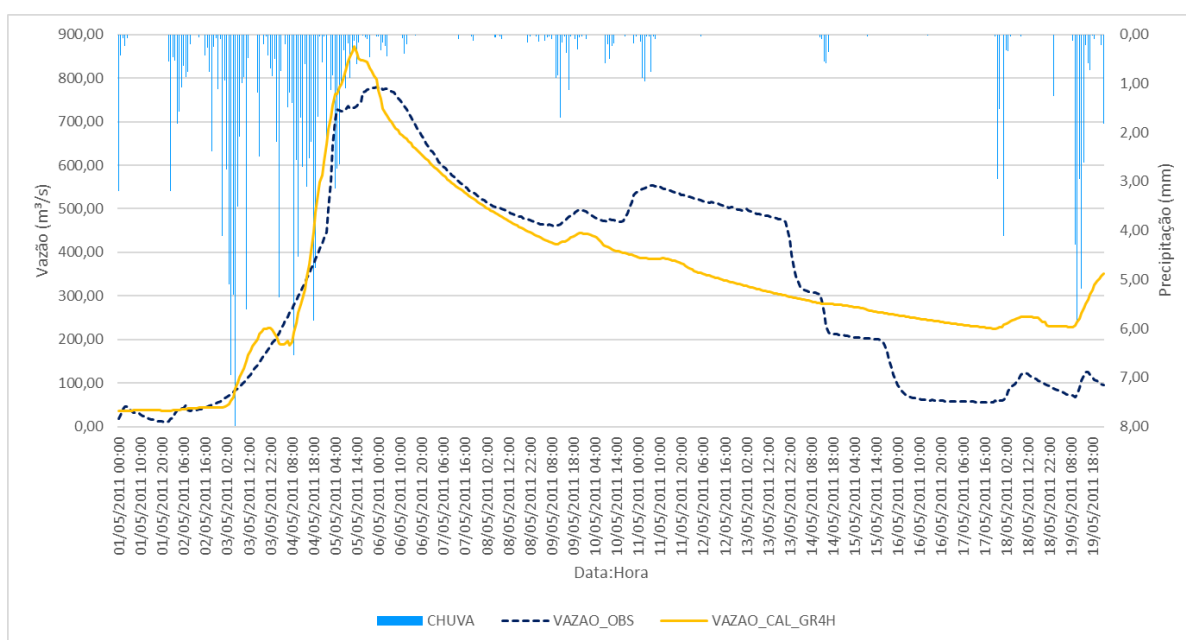
Os Gráficos 3 e 4 ilustram os hidrogramas de calibração para os dois modelos, utilizando os dados do evento de 2011. Observe-se o bom ajuste para as vazões mais altas, desde a ascensão. Além disso, ao observar o complemento do hidrograma, nota-se que o comportamento das vazões observadas não está alinhado com o período chuvoso. Esse comportamento pode ser reflexo de maior defluência das barragens a montante, o que de fato ocorreu por medida de segurança com a abertura das comportas.

Gráfico 3 - Calibração do modelo CAWM sub-diário (2011) - Rio Capibaribe (39187800).



Fonte: A Autora (2023).

Gráfico 4 - Calibração do modelo GR4H (2011) - Rio Capibaribe (39187800).



Fonte: A Autora (2023).

A análise semelhante foi conduzida para o evento de 2022 (Tabela 13), onde os valores de NSE foram registrados como 0,98 (CAWM sub-diário) e 0,86 (GR4H), sendo considerados altamente satisfatórios e exibindo ajustes gráficos notáveis. Esses resultados também se refletiram nas métricas NSEsqr e NSElog para ambos os modelos.

O resultado do Pbias para o CAWM mostrou-se próximo ao valor ideal de zero, com uma leve tendência de superestimação (0,20), enquanto o GR4H apresentou um resultado subestimado de -11,30. Tanto o R^2 quanto o RSR demonstraram um desempenho excelente, com valores significativos e muito próximos ao nível ótimo.

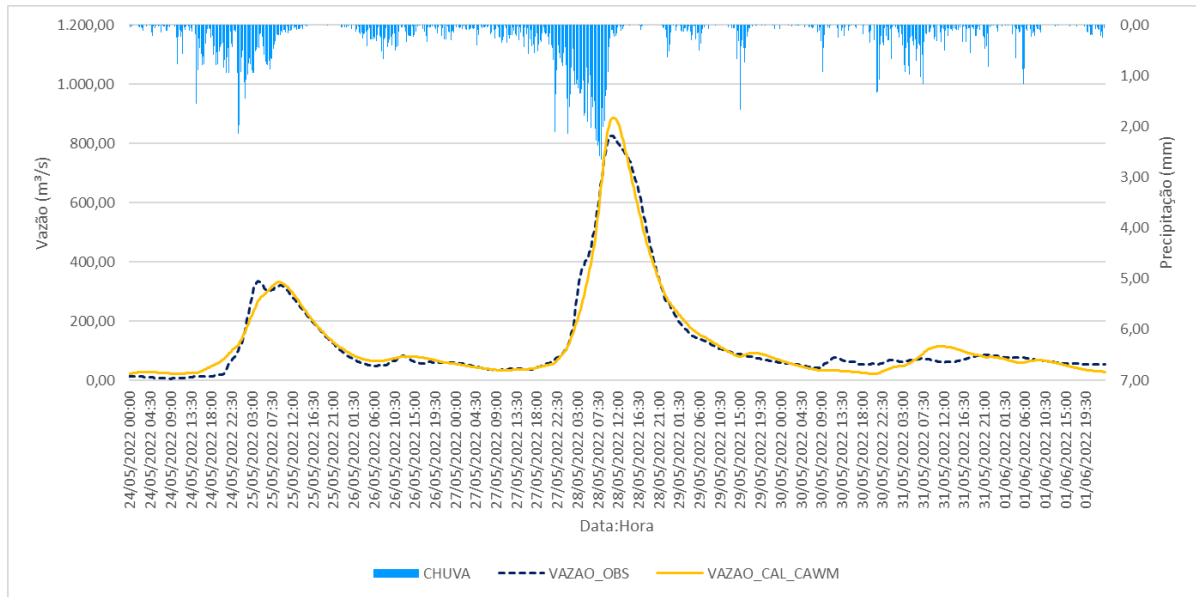
Tabela 10 - Indicadores de desempenho para a calibração do evento 2022, sub-bacia 39187800.

Indicadores do Modelo CAWM sub-diário		Indicadores do Modelo GR4H	
	CAL – 2022		CAL – 2022
NSE	0,98	NSE	0,86
NSEsqrt	0,95	NSEsqrt	0,81
NSElog	0,85	NSElog	0,80
Pbias	0,20	Pbias	-11,30
RSR	0,15	RSR	-
R^2	0,98	R^2	-

Fonte: A Autora (2023).

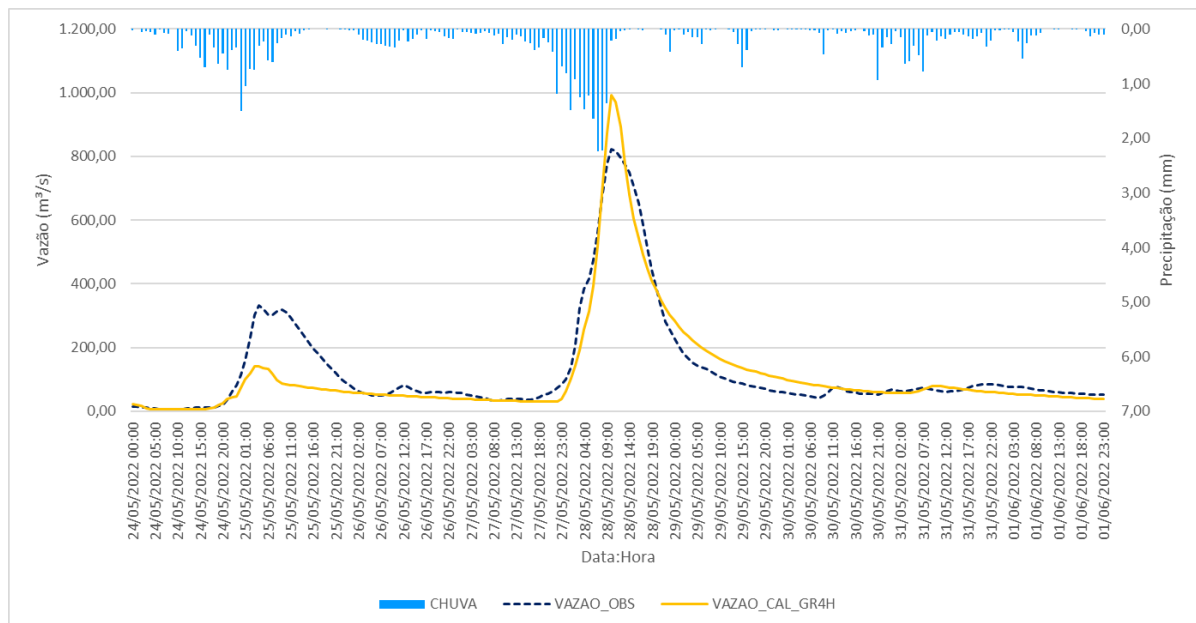
Os Gráficos 5 e 6 exibem os hidrogramas relativos ao evento de 2022 na sub-bacia de 39187800. É evidente que o modelo CAWM sub-diário representou de forma mais precisa as vazões altas, intermediárias e baixas, conforme indicado pelos parâmetros mencionados na Tabela 13. Ao realizar uma análise comparativa, torna-se notável que a modelagem utilizando o modelo hidrológico CAWM sub-diário se mostrou mais aderente aos dados observados, em consonância com a análise dos hidrogramas em comparação com o modelo GR4H.

Gráfico 5 - Calibração do modelo CAWM sub-diário (2022) - Rio Capibaribe (39187800).



Fonte: A Autora (2023).

Gráfico 6 - Calibração do modelo GR4H (2022) - Rio Capibaribe (39187800).



Fonte: A Autora (2023).

Para validação foi realizada a simulação cruzada com análise em duas possibilidades, a calibração do evento de 2011 validar o evento de 2022 e a calibração do evento de 2022 validar o evento de 2011, com resultados nas Tabelas 11 e 12 respectivamente.

Com Nash-Sutcliffe (NSE), NSEsqr e NSElog encontrando valores negativos e muito fora dos padrões aceitáveis para as métricas na literatura, é considerado que as simulações

cruzadas não geraram bons resultados. Isso é encontrado para os demais indicadores presentes na tabela. A causa e conclusão para que tal resposta tenha sido dada é que os dois eventos se constituem numa amostra muito pequena para calibrar e validar um modelo.

Tabela 11 - Simulação cruzada para o evento 2011 validado a partir do evento 2022, sub-bacia 39187800.

Indicadores do Modelo CAWM sub-diário		Indicadores do Modelo GR4H	
	CAL – 2011		CAL - 2011
NSE	-1,24	NSE	-27,82
NSEsqrt	-2,69	NSEsqrt	-5,39
NSElog	-10,23	NSElog	-2,69
Pbias	-75,74	Pbias	49,83
RSR	1,5	RSR	-
R ²	0,05	R ²	-

Fonte: A Autora (2023).

Tabela 12 - Simulação cruzada para o evento 2022 validado a partir do evento 2011, sub-bacia 39187800.

Indicadores do Modelo CAWM sub-diário		Indicadores do Modelo GR4H	
	CAL – 2022		CAL - 2022
NSE	-2,98	NSE	0,02
NSEsqrt	-2,59	NSEsqrt	0,01
NSElog	-1,13	NSElog	-0,14
Pbias	193,17	Pbias	-9,46
RSR	2,00	RSR	-
R ²	0,09	R ²	-

Fonte: A Autora (2023).

4.2 EVENTOS DA SUB-BACIA 39770000 – RIO LARGO (MUNDAÚ)

A bacia do Mundaú apresenta características climáticas distintas em comparação com a bacia do Capibaribe. Na parcela pernambucana da bacia, predomina uma região caracterizada por brejos de altitude, um clima mais ameno, maiores índices pluviométricos e

menor evapotranspiração. As séries de vazão exibem uma maior consistência nos valores, permitindo a identificação de períodos com dados de telemetria mais extensos, como será abordado a seguir.

O ano de 2017 foi escolhido para a calibração, uma vez que apresentou um evento de grande magnitude em maio do mesmo ano, com vazões atingindo valores próximos a 800 m³/s e uma cota de nível bastante elevada, caracterizando uma situação de inundação consoante os critérios da SEMARH. Por outro lado, o evento de 2020 foi selecionado para a validação do modelo, no qual as vazões foram mais baixas em comparação com 2017, mas ainda assim causaram impactos significativos e problemas para a população.

Os resultados dos indicadores de desempenho dos modelos GR4H e CAWM sub-diário, avaliados com base nos dados observados no período de calibração (evento de 2017), foram organizados na Tabela 13. Esses resultados demonstram métricas satisfatórias e ajustes indicativos de bons resultados.

Tabela 13 - Indicadores de desempenho para a calibração com evento de 2017, sub-bacia 39770000.

Indicadores do Modelo CAWM sub-diário		Indicadores do Modelo GR4H	
	CAL – 2017		CAL - 2017
NSE	0,74	NSE	0,51
NSEsqr	0,77	NSEsqr	0,51
NSElog	0,67	NSElog	0,55
Pbias	0,88	Pbias	2,20
RSR	0,51	RSR	-
R ²	0,74	R ²	-

Fonte: A Autora (2023).

Ao examinar as métricas, é evidente que o índice de Nash-Sutcliffe (NSE) obtido na modelagem do CAWM sub-diário durante a etapa de calibração alcançou um valor de 0,74, classificado como "eficiência boa" conforme a classificação de Moriasi *et al.* (2007). Para o modelo GR4H, o resultado de NSE foi considerado satisfatório, atingindo 0,51 na calibração. No que diz respeito às variações NSEsqr e NSElog, os resultados foram muito bons e bons, respectivamente, para o modelo CAWM sub-diário, enquanto podem ser considerados satisfatórios para o GR4H. Assim, as vazões intermediárias e baixas demonstraram resultados

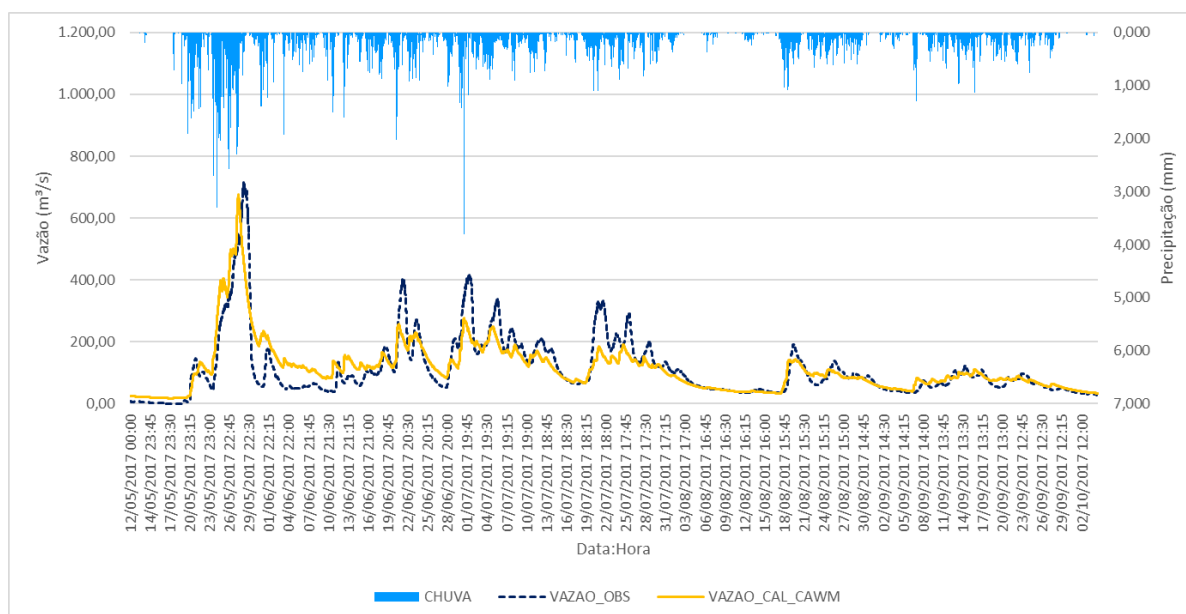
eficientes nas calibrações do CAWM sub-diário, enquanto o modelo GR4H apresentou desempenho inferior na simulação das vazões baixas devido ao NSElog.

Ao analisar o indicador Pbias, fica claro que o modelo CAWM sub-diário, com um valor de 0,88, apresentou um resultado muito bom, mas com uma tendência de superestimar os valores de vazão em comparação com os dados observados. Por outro lado, o modelo GR4H, calibrado para o evento de 2017, demonstrou uma tendência muito boa e valores superestimados, exibindo um valor de 2,20 quando comparados com os dados observados e calculados.

O indicador RSR, incorporado ao CAWM sub-diário, revelou um resultado bom, situando-se entre 0,5 e 0,6, conforme Moriasi *et al.* (2007). Além disso, o valor de R^2 indicou uma correlação positiva.

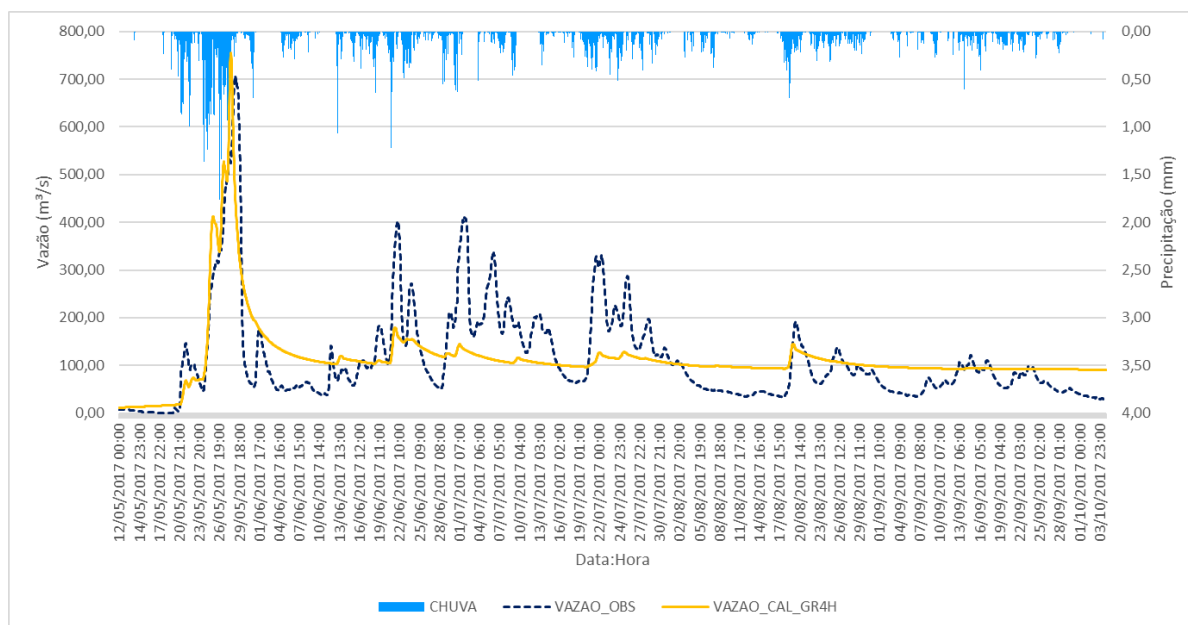
Os Gráficos 7 e 8 ilustram os hidrogramas resultantes das calibrações para o período de 2017 na sub-bacia até o posto localizado no município de Rio Largo, com o código 39770000. É perceptível que as curvas representando as vazões observadas e calibradas apresentam um ajuste apropriado no pico do valor; as vazões altas foram ajustadas de forma similar para ambos os modelos. No entanto, ao examinar mais detalhadamente os hidrogramas, fica evidente que o modelo CAWM alcançou uma calibração mais precisa.

Gráfico 7 - Calibração do modelo CAWM sub-diário (2017) - Rio Mundaú (39770000).



Fonte: A Autora (2023).

Gráfico 8 - Calibração do modelo GR4H (2017) - Rio Mundaú (39770000).



Fonte: A Autora (2023).

Para o evento de 2020, os resultados das métricas estão dispostos na Tabela 14. Vale destacar que o ano de 2020 dos dados da estação hidrológica 39770000 apresentou muitas falhas e isso foi contornado por meio de preenchimento das falhas por interpolação linear, o que é válido pelo curto intervalo de tempo.

Tabela 14 - Indicadores de desempenho para o evento 2020, sub-bacia 39770000.

Indicadores do Modelo CAWM sub-diário		Indicadores do Modelo GR4H	
	VALIDAÇÃO – 2020		VALIDAÇÃO – 2020
NSE	0,62	NSE	0,31
NSEsqr	0,69	NSEsqr	0,07
NSElog	0,75	NSElog	-0,99
Pbias	-10,05	Pbias	38,74
RSR	0,61	RSR	-
R ²	0,71	R ²	-

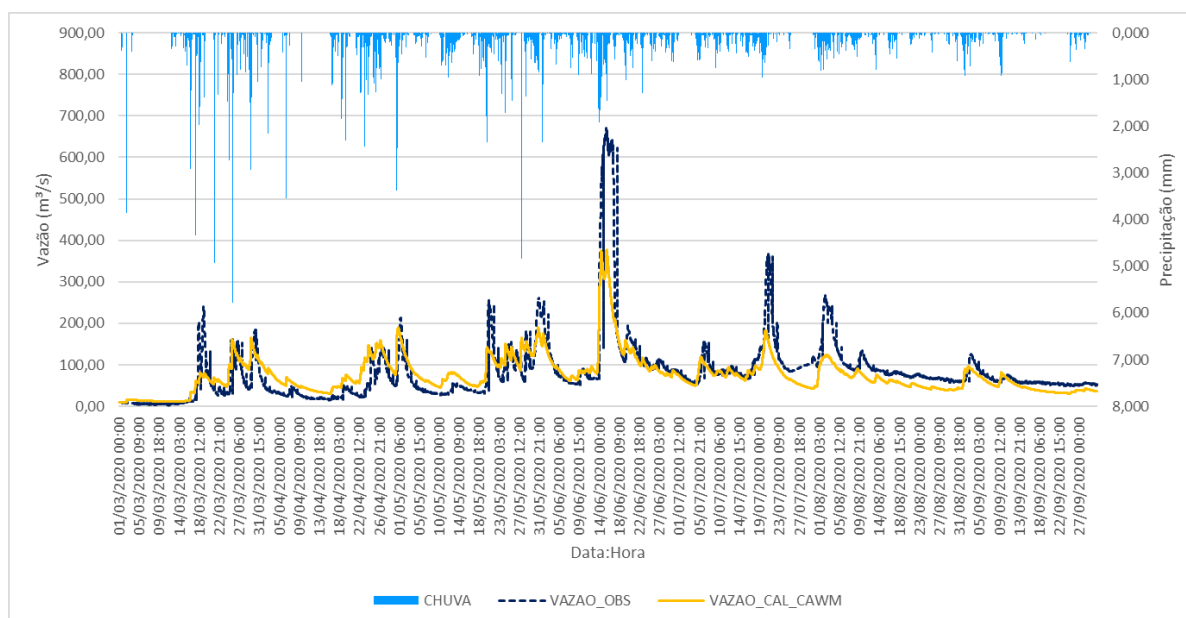
Fonte: A Autora (2023).

Os resultados expostos na tabela indicam que o desempenho do Modelo CAWM foi superior ao GR4H em todos os indicadores, sendo o NSE de 0,62 e 0,31 para os modelos CAWM sub-diário e GR4H, respectivamente, considerados satisfatório e não satisfatório.

Para as vazões intermediárias e baixas o modelo CAWM sub-diário apresentou resultados igualmente bons. Para o Pbias o valor encontrado no CAWM foi melhor que o GR4H, apresentando valor negativo de -10,05 com tendência de subestimação, e o valor positivo encontrado no GR4H tende a superestimar, o que não é satisfatório. O resultado num geral mostrou que o Modelo CAWM conseguiu realizar bem as simulações cruzadas da validação para o período maior de dados enquanto o modelo GR4H não.

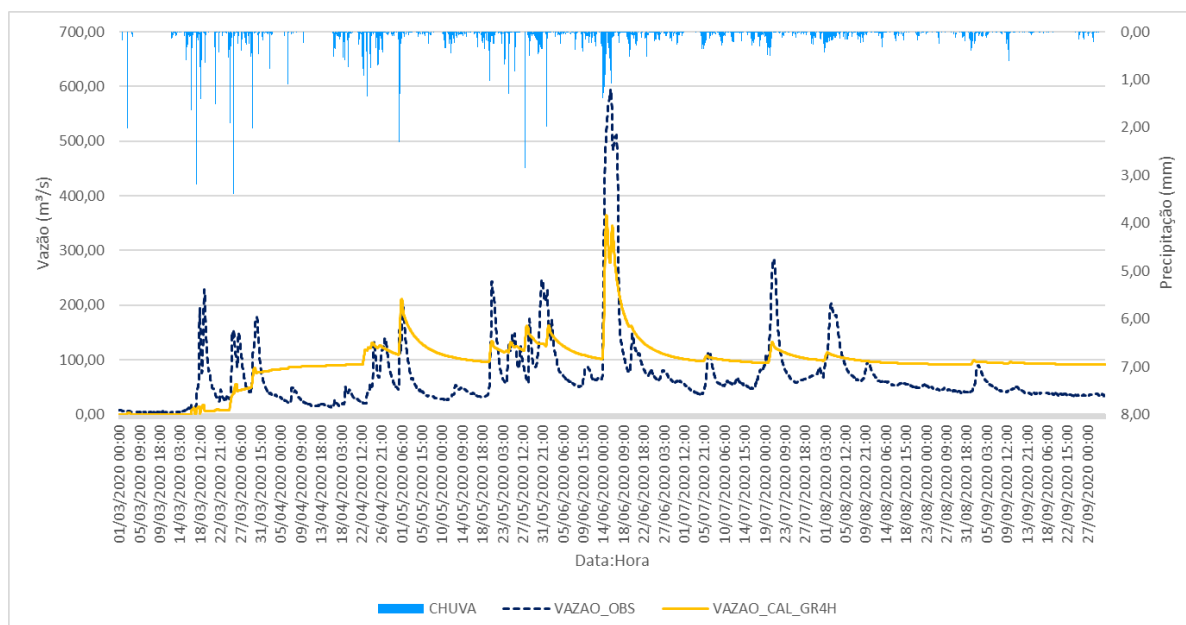
Esse resultado é perceptível nos hidrogramas onde é visto que o modelo CAWM, apesar de não ter alcançado o pico do evento, a vazão mais alta, mostrou melhor comportamento gráfico entre os dados observados e simulados, com tendências de melhor representar o evento do que o GR4H, conforme os Gráficos 9 e 10.

Gráfico 9 - Validação do modelo CAWM sub-diário (2020) - Rio Mundaú (39770000).



Fonte: A Autora (2023).

Gráfico 10 - Validação do modelo GR4H (2020) - Rio Mundaú (39770000).



Fonte: A Autora (2023).

Portanto, os resultados para a sub-bacia 39770000 (Rio Mundaú), mostraram-se, de modo geral, melhor ajustados no modelo CAWM sub-diário, com simulações intervaladas em 15 minutos, comparado com o modelo GR4H, que tendeu a não alcançar bem os picos de vazão principalmente no período de validação, bem como toda a série de dados observados da validação (simulação cruzada).

O cenário oposto de simulação cruzada também foi realizado para a análise do Mundaú, onde foi calibrado o evento de 2020, atingindo resultados satisfatórios em ambos os modelos, e foi validado o evento de 2017, com dados de parâmetros cruzados. O resultado permanece o mesmo, com o Modelo CAWM obtendo resultados bons para a simulação cruzada, enquanto no GR4H as métricas são insatisfatórias.

4.3 EVENTOS DA SUB-BACIA 39560000 – PALMARES (UNA)

Os eventos simulados na bacia do Una ocorreram após a construção da barragem de Serro Azul. Isso significa que os danos provocados por esses eventos poderiam ter sido mais significativos caso a barragem não estivesse presente, uma vez que os níveis de cheia são bastante semelhantes.

No que diz respeito à simulação do evento de 2017, os resultados calibrados revelaram um desempenho altamente satisfatório. O índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) obtido

na modelagem foi de 0,91 para o CAWM sub-diário e 0,90 para o GR4H. Além disso, os ajustes das vazões médias e baixas, medidos pelos índices NSEsqr e NSElog, também resultaram em ajustes notáveis, assim como o Pbias. Contudo, é importante observar que o Pbias para o modelo CAWM tende a superestimar os valores, enquanto o resultado do GR4H tende a subestimar os valores, conforme evidenciado na Tabela 15.

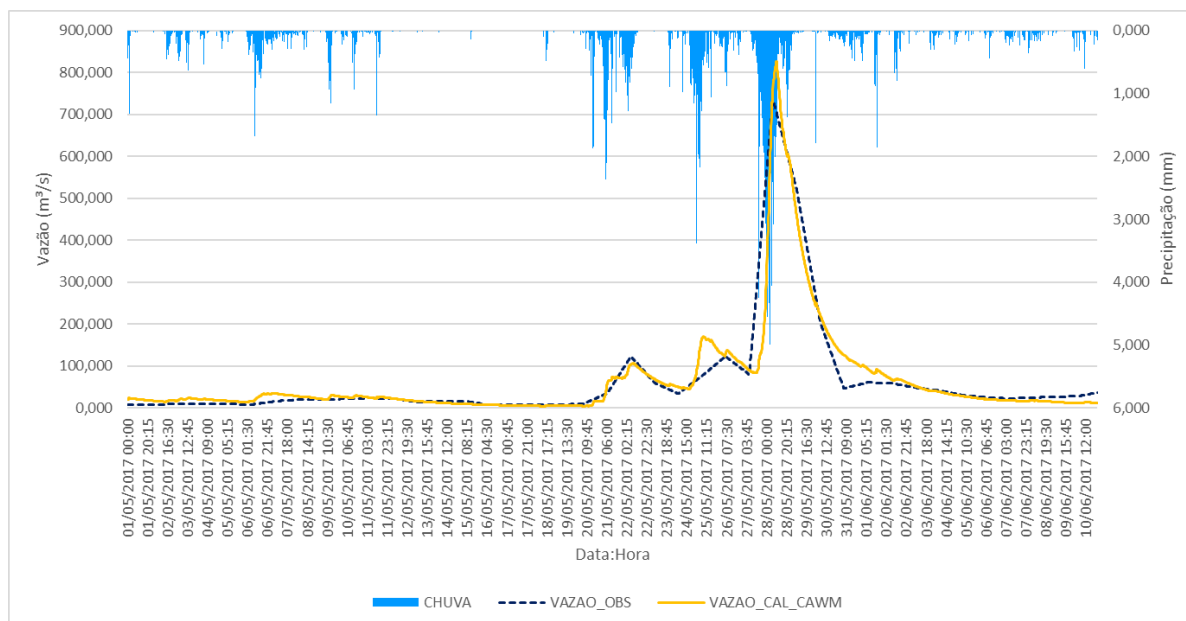
Tabela 15 – Indicadores de desempenho para a calibração do evento de 2017, sub-bacia 39560000.

Indicadores do Modelo CAWM sub-diário		Indicadores do Modelo GR4H	
	CAL – 2017		CAL – 2017
NSE	0,91	NSE	0,90
NSEsqr	0,91	NSEsqr	0,85
NSElog	0,88	NSElog	-0,80
Pbias	1,15	Pbias	-8,36
RSR	0,29	RSR	-
R²	0,91	R²	-

Fonte: A Autora (2023).

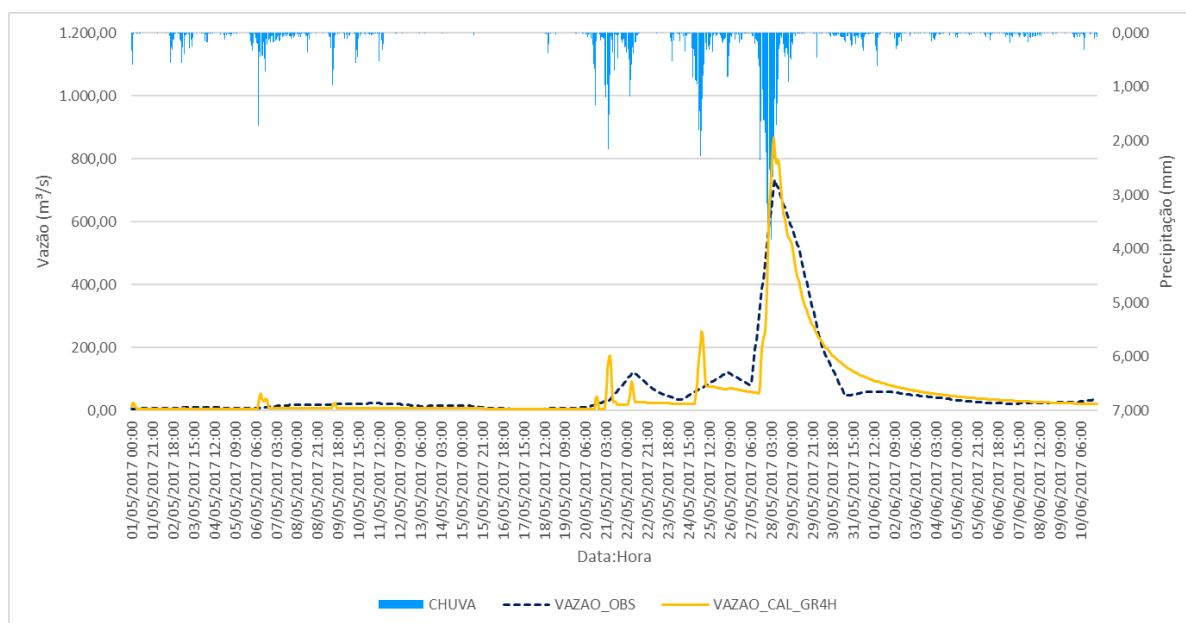
A análise dos hidrogramas das vazões observadas e simuladas, ilustrados nos Gráficos 11 e 12, revela que os ajustes dos modelos foram semelhantes. No entanto, o modelo GR4H apresentou uma ligeira dificuldade em acompanhar os valores intermediários de vazão, o que resultou em maior oscilação e deslocamento.

Gráfico 11 – Calibração do modelo CAWM sub-diário (2017) - Rio Una (39560000).



Fonte: A Autora (2023).

Gráfico 12 – Calibração do modelo GR4H (2017) - Rio Una (39560000).



Fonte: A Autora (2023).

Para a simulação dos eventos de 2022, usados na fase de validação, foi empregada uma abordagem de simulação cruzada utilizando os parâmetros calibrados em 2017. Os resultados obtidos evidenciaram um ajuste mais favorável de maneira geral para o modelo GR4H, conforme demonstrado na Tabela 16.

O índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) apresentou um melhor ajuste para o GR4H, indicando que as vazões de pico foram mais adequadamente representadas nesse

modelo, com um valor satisfatório de 0,61. Em contraste, o desempenho do CAWM sub-diário mostrou-se insatisfatório, alcançando um valor de 0,42 para o NSE.

Apesar de não ter alcançado um ajuste eficaz nos picos de vazão durante a simulação cruzada, o modelo CAWM sub-diário apresentou um desempenho superior para as vazões de média e baixa magnitude. No que diz respeito ao viés (Pbias), o modelo CAWM sub-diário demonstrou uma subestimação, enquanto o GR4H superestimou os ajustes, resultando em um Pbias de 25,24.

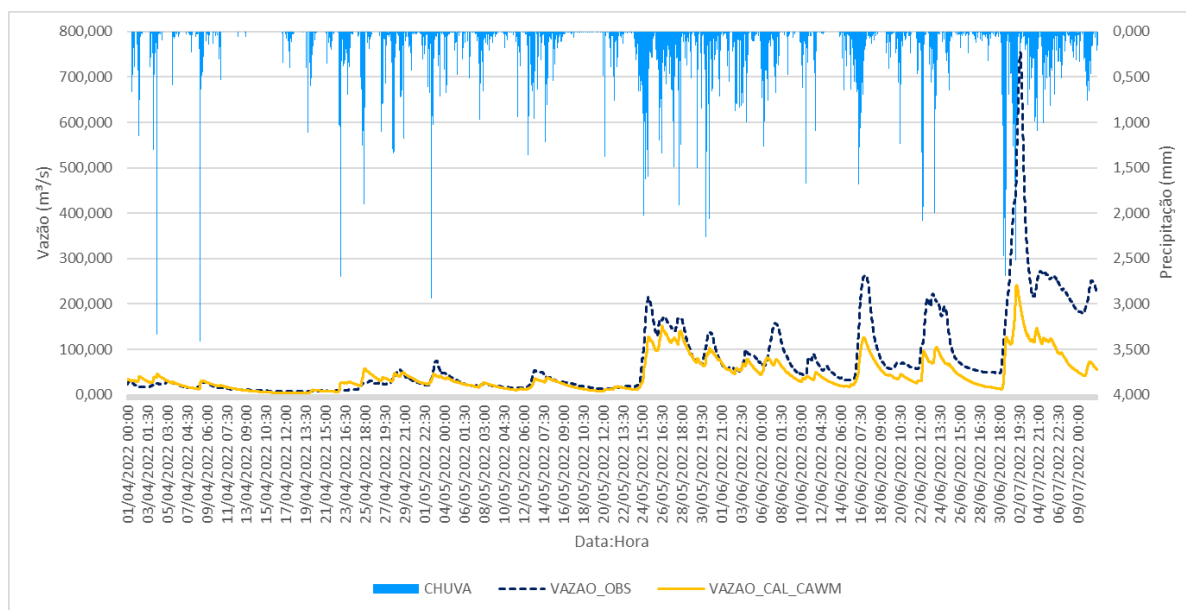
Tabela 16 – Indicadores de desempenho para a validação do evento de 2022, sub-bacia 39560000.

Indicadores do Modelo CAWM sub-diário		Indicadores do Modelo GR4H	
	VALIDAÇÃO – 2022		VALIDAÇÃO – 2022
NSE	0,42	NSE	0,61
NSEsqrt	0,63	NSEsqrt	0,71
NSElog	0,78	NSElog	0,74
Pbias	-40,77	Pbias	25,24
RSR	0,76	RSR	-
R²	0,72	R²	-

Fonte: A Autora (2023).

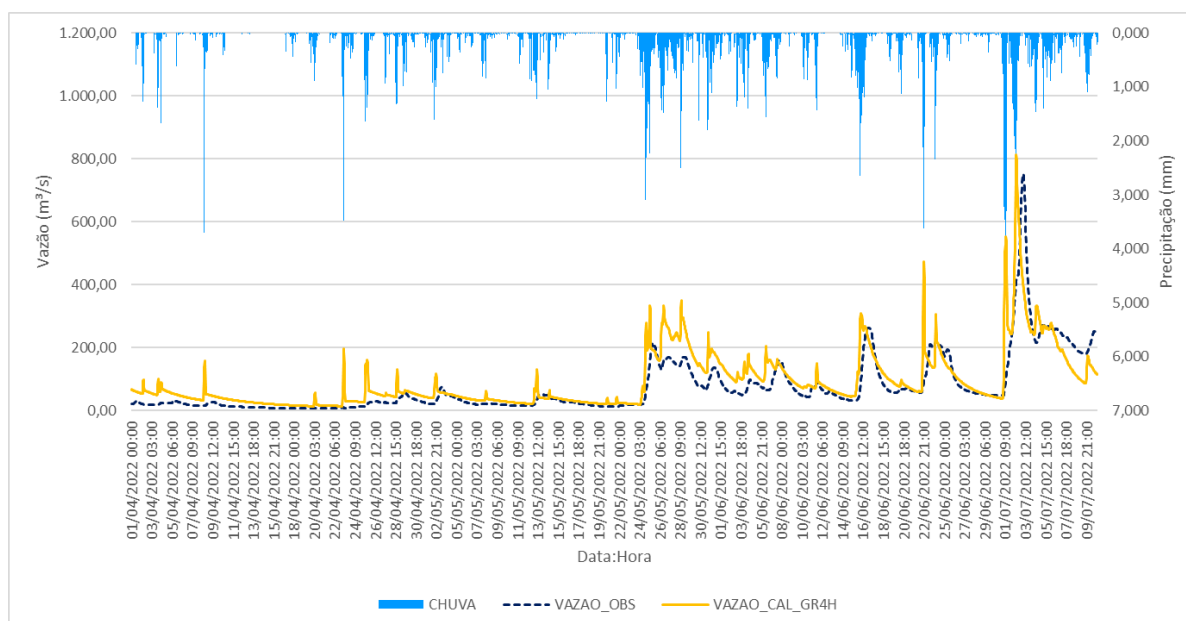
Os ajustes obtidos nas simulações podem ser visualizados nos Gráficos 13 e 14, referentes ao CAWM sub-diário e ao GR4H, respectivamente.

Gráfico 13 – Validação do modelo CAWM sub-diário (2022) - Rio Una (39560000).



Fonte: A Autora (2023).

Gráfico 14 – Validação do modelo GR4H (2022) - Rio Una (39560000).



Fonte: A Autora (2023).

4.4 EVENTOS DA SUB-BACIA 56850000 – GOVERNADOR VALADARES – MG (RIO DOCE)

Visando ampliar a aplicação do CAWM para regiões menos exploradas em trabalhos prévios e considerando a disponibilidade de dados telemétricos e a ocorrência de eventos de cheias documentados na bacia do Rio Doce, foram selecionados os eventos de 2020 e 2023. O

evento de 2020 foi empregado na fase de calibração, enquanto o evento de 2023 foi destinado à etapa de validação.

Os resultados provenientes da calibração do evento de 2020 demonstraram resultados promissores e bem ajustados, tanto para o modelo CAWM sub-diário quanto para o modelo GR4H, como evidenciado na Tabela 17. O modelo CAWM sub-diário alcançou um índice de ajuste de 0,79 para o NSE, superando o valor de 0,63 obtido pelo modelo GR4H. As métricas relativas às vazões médias e baixas demonstraram um melhor ajuste no modelo CAWM, apresentando resultado significativamente superior em comparação ao modelo GR4H.

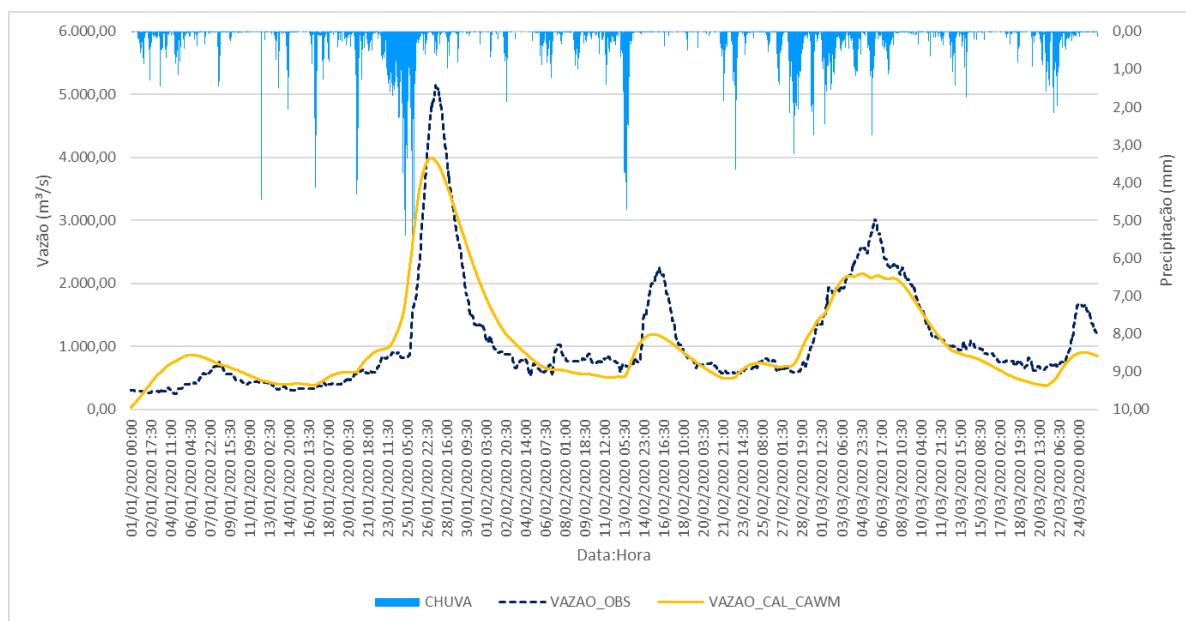
Tabela 17 – Indicadores de desempenho na calibração do evento de 2020, sub-bacia 56850000.

Indicadores do Modelo CAWM sub-diário		Indicadores do Modelo GR4H	
	CAL – 2020		CAL – 2020
NSE	0,79	NSE	0,63
NSEsqrt	0,80	NSEsqrt	0,71
NSElog	0,81	NSElog	0,76
Pbias	-1,18	Pbias	2,43
RSR	0,45	RSR	-
R²	0,79	R²	-

Fonte: A Autora (2023).

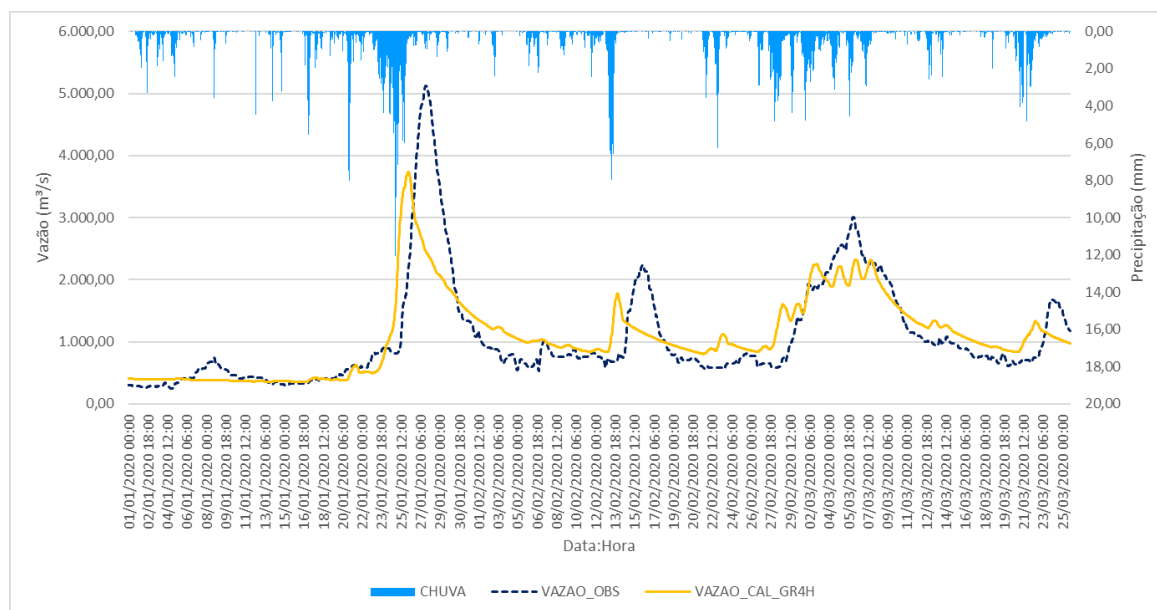
A análise do viés Pbias no modelo CAWM sub-diário indicou uma tendência à subestimação dos valores de vazão, como evidenciado no Gráfico 15, onde se observa que o pico das vazões não coincide exatamente com os valores observados, ficando ligeiramente abaixo. Por outro lado, no caso do GR4H, o Pbias mostrou uma inclinação para superestimar de forma leve os valores, embora também não tenha conseguido reproduzir com precisão os picos de vazão, como ilustrado no Gráfico 16.

Gráfico 15 – Calibração do modelo CAWM sub-diário (2020) - Rio Doce (56850000).



Fonte: A Autora (2023).

Gráfico 16 – Calibração do modelo GR4H (2020) - Rio Doce (56850000).



Fonte: A Autora (2023).

No contexto da validação pelo evento de 2023, utilizando simulação cruzada, em que os parâmetros da calibração do evento de 2020 são empregados para avaliar a precisão da simulação do evento de 2023, os resultados indicaram um desempenho superior do modelo CAWM sub-diário em relação ao GR4H em todos os indicadores, como apresentado na Tabela 18. O coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) para o modelo CAWM atingiu

0,84, um resultado considerado muito bom conforme a literatura. Por outro lado, para o modelo GR4H, o NSE foi de 0,68, indicando um desempenho satisfatório. O mesmo padrão foi refletido nos valores de NSEsqrt e NSElog, que representam os ajustes das vazões médias e baixas, respectivamente.

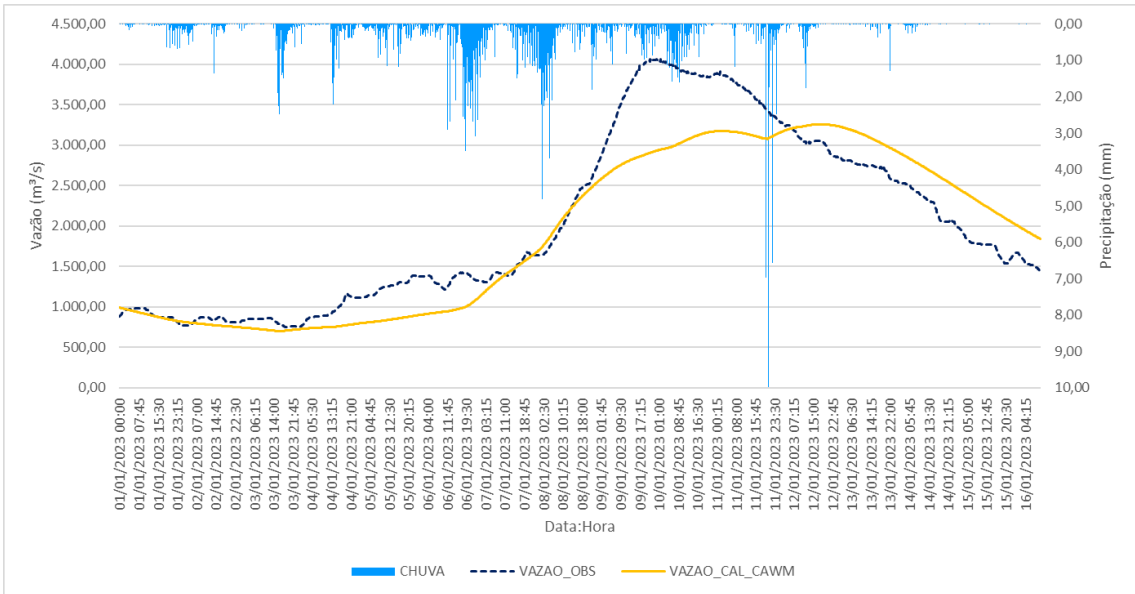
Essa tendência também é claramente evidenciada nos hidrogramas apresentados nos Gráficos 17 e 18, onde a vazão simulada pelo CAWM apresenta uma maior concordância com os dados observados em comparação com o GR4H.

Tabela 18 – Indicadores de desempenho na validação do evento de 2023, sub-bacia 56850000.

Indicadores do Modelo CAWM sub-diário		Indicadores do Modelo GR4H	
	VALIDAÇÃO – 2023		VALIDAÇÃO – 2023
NSE	0,84	NSE	0,68
NSEsqrt	0,86	NSEsqrt	0,68
NSElog	0,87	NSElog	0,65
Pbias	-5,77	Pbias	8,59
RSR	0,40	RSR	-
R²	0,85	R²	-

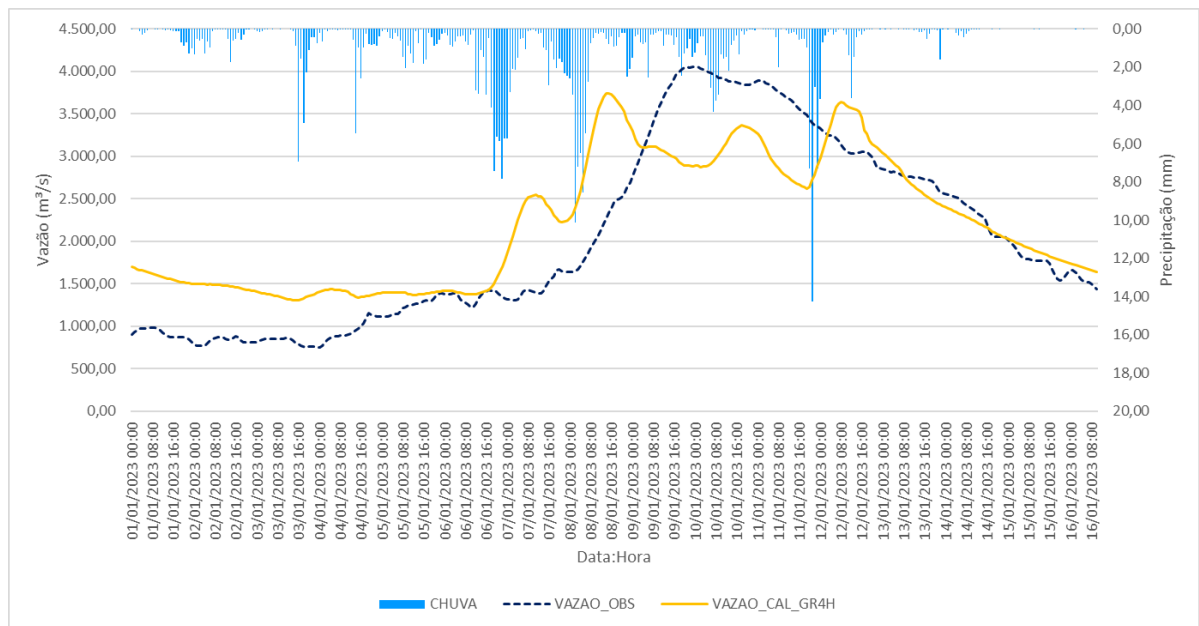
Fonte: A Autora (2023).

Gráfico 17 – Validação do modelo CAWM sub-diário (2023) - Rio Doce (56850000).



Fonte: A Autora (2023).

Gráfico 18 – Validação do modelo GR4H (2023) - Rio Doce (56850000).



Fonte: A Autora (2023).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A compreensão aprofundada do comportamento e das características dos eventos de cheias é uma tarefa contínua e desafiadora para os modelos hidrológicos em operação. A constante evolução e aprimoramento desses modelos são requisitos evidentes, principalmente na busca por maior precisão e representatividade dos eventos, incluindo aqueles de natureza sub-diária.

O modelo CAWM sub-diário, uma derivação das versões diárias CAWM IV e V, continua passando por constante refinamento e melhorias a fim de representar de maneira abrangente múltiplos eventos em diferentes regiões analisadas. As adaptações realizadas neste estudo, entretanto, têm apresentado resultados satisfatórios e promissores.

Os eventos calibrados demonstraram, de forma geral, indicadores de desempenho positivos para o modelo CAWM sub-diário, os quais tendem a superar aqueles obtidos pelo modelo GR4H. Contudo, é importante ressaltar que a quantidade de eventos calibrados e simulados é limitada, devido à disponibilidade reduzida de dados de nível/vazão registrados por telemetria. Essa limitação impacta a análise, restringindo-a a um número reduzido de eventos.

Em conclusão, é crucial observar que apesar dos desafios enfrentados é evidente o potencial da aplicação do modelo CAWM sub-diário. Os resultados obtidos são positivos e oferecem informações relevantes para apoiar as decisões relacionadas aos eventos de cheias e inundações repentinas, bem como oferecem informações valiosas que podem embasar decisões relacionadas a esses fenômenos hidrológicos complexos.

Para pesquisas futuras, recomenda-se uma investigação mais aprofundada sobre o impacto de barragens a montante nos pontos de análise, tendo como exemplo o evento de 2011 no rio Capibaribe. Além disso, ampliar a amostra de eventos analisados para incluir uma variedade maior de testes é crucial. Aperfeiçoamentos na estrutura do modelo, visando aprimorar seu desempenho em diferentes contextos, também merecem atenção.

Sugere-se ainda a análise de eventos baseados em conjuntos de dados provenientes de previsões de radar e satélite, permitindo a expansão da abordagem para áreas com carência de postos pluviométricos. Isso pode fornecer uma compreensão mais abrangente e precisa em regiões onde dados tradicionais são escassos. Em conjunto, essas direções de pesquisa têm o potencial de contribuir significativamente para o avanço contínuo no entendimento e na gestão dos eventos hidrológicos críticos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista da FAE**, v. 20, n. 1, p. 129–137, 2017.

ANA. Agência Nacional de Águas. Portal HidroWeb, 2021. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>>.

APAC. Agência Pernambucana de Águas e Clima. Bacia do Rio Capibaribe 2020a. **Agência Pernambucana de Águas e Clima**. Disponível em: <<http://200.238.107.184/bacias-hidrograficas/40-bacias-hidrograficas/193-bacia-do-rio-capibaribe>>. Acesso em: 30 de set. de 2020.

APAC. Agência Pernambucana de Águas e Clima. Bacia do Rio Mundaú 2020b. **Agência Pernambucana de Águas e Clima**. Disponível em: <<http://200.238.107.184/bacias-hidrograficas/40-bacias-hidrograficas/199-bacia-do-rio-mundau>>. Acesso em: 03 de out. de 2020.

APAC. Agência Pernambucana de Águas e Clima. Bacia do Rio Uma 2020d. **Agência Pernambucana de Águas e Clima**. Disponível em: <<http://200.238.107.184/bacias-hidrograficas/40-bacias-hidrograficas/209-bacia-do-rio-una>>. Acesso em: 03 de out. de 2020.

AVAND, M.; MORADI, H.; LASBOYEE, M. R.; Using machine learning models, remote sensing, and GIS to investigate the effects of changing climates and land uses on flood probability. **Journal of Hydrology**, v. 595, n. July 2020, p. 125663, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125663>>.

AYZEL, G.; HEISTERMANN, M. The effect of calibration data length on the performance of a conceptual hydrological model versus LSTM and GRU: A case study for six basins from the CAMELS dataset. **Computers and Geosciences**, v. 149, n. February, p. 104708, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2021.104708>>.

BACK, Á. J. Alternative model of intense rainfall equation obtained from daily rainfall disaggregation. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto alegre, v. 25, e2, p. 1–11, 2020.

BENNETT, James C.; ROBERTSON, David E.; SHRESTHA, Durga Lal; et al. A System for Continuous Hydrological Ensemble Forecasting (SCHEF) to lead times of 9days. **Journal of Hydrology**, v. 519, n. PD, p. 2832–2846, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.08.010>>.

BINNS, A. D. Flood mitigation measures in an era of evolving flood risk. **Journal of Flood Risk Management**, v. 13, n. 3, p. 13–15, 2020.

BOITHIAS, L.; SAUVAGE, S.; LENICA, A.; ROUX, H.; ABBASPOUR K. C.; LARNIER, K.; DARTUS, D.; SÁNCHEZ-PÉREZ, J. M. Simulating flash floods at hourly time-step using the SWAT model. **Water**, v. 9, n. 929, p. 1–25, 2017.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa Civil. **Banco de dados e registros de desastres**: sistema integrado de informações sobre desastres - S2ID. 2013.

BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; SRINIVASAN, R.; et al. Simulating sub-daily hydrological process with SWAT: a review. **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, n. 12, p. 1415–1423, 2019.

CBH-DOCE. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Doce. A Bacia. **Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Doce**. Disponível em: < <https://www.cbhdoce.org.br/institucional/a-bacia>>. Acesso em: 01 de jun. de 2023.

CIRILO, J. A. Modelos CAWM IV e V – Memorial descritivo. **Universidade Federal de Pernambuco – UFPE**. 2022. Disponível em: <<https://www.ufpe.br/web/grh>>.

CIRILO, J. A.; VERÇOSA, L. F. M.; GOMES, M. M. A.; FEITOZA, M. A. B.; FERRAZ, G. F.; SILVA, B. M. Development and application of a rainfall-runoff model for semi arid regions. 2020. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 25, e15, 2020.

Confederação Nacional de Municípios, C.N.M., 2022. Danos e prejuízos causados por desastres no Brasil entre 2013 a 2023, **Confederação Nacional de Municípios. Estudos Técnicos/Defesa Civil**. 2023. Disponível em: <<https://www.cnm.org.br/biblioteca/exibe/4943>>.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. SACE – Bacia do Rio Doce. **Serviço Geológico do Brasil**. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/sace/index_bacias_monitoradas.php?getbacia=bdoce#>. Acesso em: 01 de jun. de 2023.

DA SILVEIRA, A. L. L.; DORNELLES, F.; GOLDENFUM, J. A.; POSSA, T. M.; COLLISCHONN, W.; MORAES, S. R. A histórica cheia de 1941 na bacia hidrográfica do Guaíba. In: ZANANDREA, Franciele; et al. **Desastres e água: eventos históricos no Brasil**. Porto Alegre, RS: ABRHidro, ed.1, 2023. p. 29-47.

DANTAS, C.E.O.; CIRILO, J. A.; RIBEIRO NETO, A.; SILVA, E. R. Caracterização da Formação de Cheias na Bacia do Rio Una em Pernambuco: Análise Estatística Regional. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.19, p.239 - 248, 2014.

DE AGUILAR, M. G.; COSTA, V. A. F. A regional similarity-based approach for sub-daily rainfall nonparametric generation. **Revista Brasileira de Recursos Hidricos**, Porto Alegre, v. 25, e5, 2020.

EDIJATNO; MICHEL, C.. Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, n. 2, p.113-122, 1989.

EMBRAPA TERRITORIAL. Satélites de Monitoramento. Campinas, 2018. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento> >. Acesso em: 27 nov. 2022.

FANTA, Václav; ŠÁLEK, Miroslav; SKLENICKA, Petr. How long do floods throughout the millennium remain in the collective memory?. **Nature communications**, v. 10, n. 1, p. 1-9, 2019.

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). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M. Considerações sobre as inundações no Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., 2005, João Pessoa. Anais... João Pessoa: ABRH, 2005.

GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M.; PELLERIN, J. R. G. M. Proposta metodológica para mapeamento de áreas de risco a inundação: estudo de caso do município de Rio Negrinho – SC. **Boletim de Geografia**, v. 30, n. 1, p. 81–100, 2012.

GOMES, M. M. A. **Abordagem integrada de modelagem hidrológica e operação de barragens para avaliação da eficiência do controle de cheias na bacia do rio Capibaribe**. 2019. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

GOMES, M. M. de A.; VERÇOSA, L. F. de M.; CIRILO, J. A. Hydrologic models coupled with 2D hydrodynamic model for high-resolution urban flood simulation. **Natural Hazards**, 2021.

GUDURU, J. U.; JILO, N. B.; RABBA, Z. A.; et al. Rainfall-runoff modeling using HEC-HMS model for Meki river watershed, rift valley basin, Ethiopia. **Journal of African Earth Sciences**, v. 197, n. July 2022, p. 104743, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104743>>.

GUHA-SAPIR, D., VOS, F., BELOW, R., PONSERRE, S. **Annual Disaster Statistical Review 2011: the numbers and trends**. CRED, Brussels, 2012. Disponível em: <http://www.cred.be/sites/default/files/ADSR_2011.pdf>.

HIRABAYASHI, Y.; MAHENDRAN, R.; KOIRALA, S.; et al. Global flood risk under climate change. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 9, p. 816–821, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1911>>.

HIRPESSA, Y.A.; HAILU, I.D. Assessment of failure on drainage structures along the Ethiopian national railway line of sebeta-mieso (case study of Akaki river crossing drainage structure) **Int. J. Res. -GRANTHAALAYAH**, 2019.

IPCC. **Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

JACOBSON, C. R. Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 6, p.1438-1448, jun. 2011.

JEONG, J.; KANNAN, N.; ARNOLD, J.; GLICK, R.; DE LEILA, G.; SRINIVASAN, R. Development and Integration of Sub-hourly Rainfall-Runoff Modeling Capability Within a Watershed Model. **Water Resour Manage.** p. 4505-4527, 2010.

KAISER, I. M. **Avaliação de métodos de composição de campos de precipitação para uso em modelos hidrológicos distribuídos.** 2006. 400f. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

LI, D.; QU, S.; SHI, P.; CHEN, X.; XUE, F.; GOU, J.; ZHANG, W. Development and integration of sub-daily flood modelling capability within the SWAT model and a comparison with XAJ model. **Water**, v. 10, n. 1263, p. 1–17, 2018.

LI, Y.; DELIBERTY, T. Evaluating hourly SWAT streamflow simulations for urbanized and forest watersheds across northwestern Delaware, US. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 35, n. 6, p. 1145–1159, 2021.

LIMA NETO, O. C. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica com intervalo de tempo sub-diário na bacia do rio Una em Pernambuco.** 2019. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

LIMA NETO, O. C.; NETO, A. R.; ALVES, F. H. B.; CIRILO, J. A. Sub-daily hydrological-hydrodynamic simulation in flash flood basins: Una river (Pernambuco/Brazil). **Ambiente & Água**, v. 15, n. 5, 2020.

LONDE, L. R.; COUTINHO, M. P.; GREGÓRIO, L. T.; SANTOS, L. B. L.; SORIANO, E. Desastres relacionados à água no Brasil: perspectivas e recomendações. **Ambiente & Sociedade**, v. 17, n. 4, p. 133–152, 2014.

LUCAS, E. W. M.; SOUZA, F. A. S.; SILVA, F. D. S.; LUCIO, P. S. Modelagem hidrológica determinística e estocástica aplicada à região hidrográfica do Xingu – Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 3, p. 308–322, 2009.

MADSEN, H.; LAWRENCE, D.; LANG, M.; *et al.* Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. **Journal of Hydrology**, v. 519, n. PD, p. 3634–3650, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.003>>.

MAHARJAN, G. R.; PARK, Y. S.; KIM, N. W.; *et al.* Evaluation of SWAT sub-daily runoff estimation at small agricultural watershed in Korea. **Frontiers of Environmental Science & Engineering in China**, v. 7, n. 1, p. 109–119, 2013.

MARENGO, J. A.; SELUCHI, M. E.; CUNHA, A. P.; CUARTAS, L. A.; GONÇALVES, D.; SPERLING, V. B.; RAMOS, A. M.; DOLIF, G.; SAITO, S.; BENDER, F.; LOPES, T. R.; ALVALA, R.; MORAES, O. L. Heavy rainfall associated with floods in southeastern Brazil in November–December 2021. **Natural Hazards**, 116, p. 3617-3644, 2023.

MATHEVET, T. **Quels modèles pluie-débit globaux au pas de temps horaire? Développements empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants.** PhD Thesis, l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, Paris, 2005.

MATHEVET, T.; MICHEL, C.; PERRIN, C.; et al. Experimental Design Of A Lumped Hydrological Model Representing The Rainfall-Runoff Transformation At The Hourly. n. May, p. 25–29, 2004.

MIAO, Q.; YANG, D.; YANG, H.; LI, Z. Establishing a rainfall threshold for flash flood warnings in hina ' s mountainous areas based on a distributed hydrological model. **Journal of Hydrology**, 2016. v. 541, p. 371–386.

MICROSOFT. Microsoft Excel. **Criar uma previsão no Excel para Windows**. Disponível em: < <https://support.microsoft.com/pt-br/office/criar-uma-previs%C3%A3o-no-excel-para-windows-22c500da-6da7-45e5-bfdc-60a7062329fd>>. Acesso em: 03 de nov. de 2022.

MONTE, B. E. O. *et al.* Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada ao mapeamento de áreas inundáveis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 152–167, 2016.

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. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, 2007. v. 50, n. 3, p. 885–900.

NETO, V. L. S.; VIOLA, M. R.; DA SILVA, D. D.; DE MELLO, C. R.; PEREIRA, S. B.; GIONGO, M. Daily rainfall disaggregation for Tocantins State, Brazil. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 12, n. 4, 2017.

NOBREGA, F. Maior tragédia do século em Pernambuco, mortes pelas chuvas de 2022 superam total da cheia de 1975. **Folha de Pernambuco**. 2022. Disponível em: <<https://www.folhape.com.br/noticias/maior-tragedia-do-seculo-em-pernambuco-mortes-pelas-chuvas-de-2022/228963/>>. Acesso em: 29 dez. 2022.

OCHA. **Natural Disasters in Latin America and the Caribbean**. Coordination of Humanitarian Affairs. Panamá, p. 20. 2019. Disponível em:<https://www.humanitarianresponse.info/sites/www.humanitarianresponse.info/files/documents/files/20191202-ocha-desastres_naturales2.pdf>.

OLIVEIRA, D. S.; MOUSINHO, F. H.G.; CARVALHO, L. M.; MEDEIROS, L. D.; PEREIRA, M. M. A.; CIRILO, J. A. Oficina de modelagem hidrológica da UFPE: Aplicação de modelos concentrados a grandes bacias – Estudo de caso bacia do rio Tocantins-Araguaia. **XVI Simpósio De Recursos Hídricos Do Nordeste e 15º Simpósio De Hidráulica E Recursos Hídricos Dos Países De Língua Portuguesa**. 2022.

OLIVEIRA, G. A.; CIRILO, J. A.; BRITO, P. L.; NAIM, N. E. Qualidade do Posicionamento em Aplicativos VGI Obtido por Sensores de Localização em Smartphones. **Revista Brasileira de Cartografia**, V71, p806-831, 2019. Doi: 10.14393/rbcv71n3-49478.

OLIVERIA, G. G. Desastre hidrológico ocorrido em janeiro de 2010 na porção central do Rio Grande do Sul (RS). In: ZANANDREA, Franciele; *et al.* **Desastres e água: eventos históricos no Brasil**. Porto Alegre, RS: ABRHidro, ed.1, 2023. p. 197-215.

- PATEL, D. P.; DHOLAKIA, M. B. Feasible structural and non-structural measures to minimize effect of flood in lower tapi basin. **WSEAS Transactions on Fluid Mechanics**, v. 5, n. 3, p. 104–121, 2010.
- PERRIN, C.; MICHEL, C.; ANDRÉASSIAN, V. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. **Journal of Hydrology**, v. 279, n. 1–4, p. 275–289, 2003.
- PIADEH, F.; BEHZADIAN, K.; ALANI, A. M. A critical review of real-time modelling of flood forecasting in urban drainage systems. **Journal of Hydrology**, v. 607, n. January, p. 127476, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127476>>.
- PINHEIRO, A; SEVERO, L. Enchentes e inundações na bacia do rio Itajaí, SC. In: ZANANDREA, Franciele; *et al.* **Desastres e água: eventos históricos no Brasil**. Porto Alegre, RS: ABRHidro, ed.1, 2023. p. 85-101.
- RAMESH, V. Application of the HEC-HMS Model for Runoff Simulation in the Krishna Basin Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of by, 2017.
- RE MUNICH, **Flood risks on the rise: Underestimated natural hazard, devastating damage** (2022). Disponível em: <<https://www.munichre.com/en/risks/natural-disasters-losses-are-trending-upwards/floods-and-flash-floods-underestimated-natural-hazards.html>>.
- RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Modelos hidrológicos para gestão ambiental. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) Programa de Ciência e Tecnologia para a Gestão de Ecossistemas. Ação “Métodos, modelos e geoinformação para a gestão ambiental”. Relatório Técnico Parcial. São Paulo, 60p, 2000.
- RIBEIRO NETO, A; CIRILO, J. A.; DANTAS, C.E.O.; SILVA, E. R. Caracterização da formação de cheias na bacia do rio Una em Pernambuco: simulação hidrológica-hidrodinâmica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.20, p.394 - 403, 2015.
- RIBEIRO, A. A. S. R.; OLIVEIRA, G. A.; CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; BATISTA, L. F. D. R.; MELO, V. B. Floodplain reconstitution based on data collected via smartphones: a methodological approach to hydrological risk mapping. **Brazilian Journal of Water Resources**, v. 25, n. 41. 2020. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190179>
- RIBEIRO, R. A.; AYMONE, J. L. F.; LEÃO, S. Z. **Aplicação do geoprocessamento no estudo da impermeabilidade urbana**. In: IX Encontro de Modelagem Computacional. Anais [...], Belo Horizonte-MG, CEFET-MG-IPRJ/UERJ, 2006.
- SAHU, M. K.; SHWETHA, H. R.; DWARAKISH, G. S. State-of-the-art hydrological models and application of the HEC-HMS model: a review. **Modeling Earth Systems and Environment**, n. 0123456789, 2023.
- SCHWARZ, H; ABATTI, B. H; ZANANDREA, F; MICHEL, G. P; PAUL, L. R; SALVADOR, C. G; KOBIYAMA, M; SILVA, M A; MACHADO, C. M. O desastre de Presidente Getúlio, Ibirama e Rio do Sul, no Alto Vale do Itajaí – SC, em dezembro de 2020. In: ZANANDREA, Franciele; *et al.* **Desastres e água: eventos históricos no Brasil**. Porto Alegre, RS: ABRHidro, ed.1, 2023. p. 277-297.

SEMARH. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos – AL. **Boletim do Sistema De Alerta Dos Níveis Dos Rios**. Disponível em: <http://sistemasweb.itec.al.gov.br/semarh/boletim_alerta/>. Acesso em: 15 de set. de 2022.

SHAO, M.; ZHAO, G.; KAO, S. C.; *et al.* Quantifying the effects of urbanization on floods in a changing environment to promote water security — A case study of two adjacent basins in Texas. **Journal of Hydrology**, v. 589, n. June, p. 125154, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125154>>.

SOARES, B. M.; MAGNO, G.; CALADO, C.; *et al.* Aplicação de modelos concentrados a grandes bacias: estudo de caso da bacia do Atlântico Nordeste Oriental. **XVI Simpósio De Recursos Hídricos Do Nordeste e 15º Simpósio De Hidráulica E Recursos Hídricos Dos Países De Língua Portuguesa**. 2022.

SOK, K.; OEURN, C. Application of HEC-HMS model to assess streamflow and water resources availability in stung sangker catchment of mekong' tonle sap lake Basin in Cambodia. **Inst. Technol. Cambodia**, 2016.

STEVANUX, J. C.; LATRUBESSE, E. M.; HERMANN, M. L. de P.; *et al.* Floods in Urban Areas of Brazil. **Developments in Earth Surface Processes**, v. 13, n. C, p. 245–266, 2009.

TABARI, HOSSEIN. Extreme value analysis dilemma for climate change impact assessment on global flood and extreme precipitation. **Journal of Hydrology**, v. 593, n. August 2020, p. 125932, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125932>>.

TASSEW, B.G.; BELETE, M.A.; MIEGEL, K. Application of HEC-HMS model for flow simulation in the Lake Tana Basin: the case of Gilgel Abay catchment, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia **Hydrology**, 2019.

TRAORE, V. B.; SAMBOU, S.; TAMBA, S.; FALL, S.; DIAW, A. T.; CISSE, M. T. Calibrating the Rainfall-Runoff Model GR4J and GR2M on the Koulountou River Basin, a Tributary of the Gambia River. **American Journal of Environmental Protection**, v. 3, n. 1, 20, p. 36-44, 2014.

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2005. 678 p. ISBN 85-7025-823-2.

TUCCI, C. E. M. **Inundações urbanas**. Porto Alegre, RS: ABRH/RHAMA, 2007.

TUCCI, C. E. M. Modelos hidrológicos distribuídos. 2010. Disponível em: <<http://rhama.com.br/blog/index.php/sem-categoria/modelos-hidrologicos-distribuidos/>>. Acesso em: 24 ago. 2020.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. **Inundações Urbanas na América do Sul**. Ed: ABRH. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

U.S. Army Corps of Engineers, 2008. Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) Applications Guide: Version 3.1.0. **Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center**, Davis, CA. UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Earth

Resources Observation and Science (EROS) Center. USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Non-Void Filled. 2018. Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-non?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects>.

VAN LIEW, M. W.; VEITH, T. L.; BOSCH, D. D.; ARNOLD, J. G. Suitability of SWAT for the Conservation effects assessment project: A comparison on USDA-ARS watersheds. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 12, n. 2, p. 173-189, 2007. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2007\)12:2\(173\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:2(173)).

VANELLI, F; MONTEIRO, L. R; FAN, F. M; GOLDENFUM, J. A; MARQUES, R. Inundação de 1974 na bacia do rio Tubarão: impactos no município de Tubarão (SC). In: ZANANDREA, Franciele; *et al.* **Desastres e água: eventos históricos no Brasil**. Porto Alegre, RS: ABRHidro, ed.1, 2023. p. 49-69.

VINK, G. *et al.* Why the United States Is Becoming More Vulnerable to Natural Disasters. **Eos, Transactions, American Geophysical Union**, v. 79, n. 44, p. 533-537, 1998.

WANG, L.; CUI, S.; LI, Y.; *et al.* A review of the flood management: from flood control to flood resilience. **Heliyon**, v. 8, n. 11, p. e11763, 2022.

WANG, Q.; XU, Y.; WANG, J.; *et al.* Assessing sub-daily rainstorm variability and its effects on flood processes in the Yangtze River Delta region. **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, n. 16, p. 1972–1981, 2019.

WANG, S.; ZHANG, L.; SHE, D.; *et al.* Future projections of flooding characteristics in the Lancang-Mekong River Basin under climate change. **Journal of Hydrology**, v. 602, n. August, p. 126778, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126778>>.

WASKO, C; NATHAN, R; STEIN, L; *et al.* Evidence of shorter more extreme rainfalls and increased flood variability under climate change. **Journal of Hydrology**, v. 603, n. PB, p. 126994, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126994>>.

WENDEL, M. **Enchentes que atingiram Palmares completam 10 anos com uma barragem entregue; cinco foram prometidas em 2010**. 2020. Disponível em: <<https://g1.globo.com/pe/caruaru-regiao/noticia/2020/06/19/enchentes-que-atingiram-palmares-completam-10-anos-com-uma-barragem-entregue-cinco-foram-prometidas-em-2010.ghtml>>. Acesso em: 13 out. 2020.

XUAN, W.; XU, Yue P.; FU, Q.; *et al.* Hydrological responses to climate change in Yarlung Zangbo River basin, Southwest China. **Journal of Hydrology**, v. 597, n. November 2020, p. 125761, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125761>>.

YANG, W.; CHEN, L.; CHEN, X.; *et al.* Sub-daily precipitation-streamflow modelling of the karst-dominated basin using an improved grid-based distributed Xinanjiang hydrological model. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 42, n. May, p. 101125, 2022.

YAPO, P. O.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: Sensitivity to calibration data. **Journal of Hydrology**, v. 181, n. 1–4, p. 23–48, 1996.

YU, D.; XIE, P.; DONG, X.; et al. Improvement of the SWAT model for event-based flood forecasting on a sub-daily time scale. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, p. 1–24, 2018.

YUAN, W.; LIU, M.; WAN, F. Calculation of Critical Rainfall for Small-Watershed Flash Floods Based on the HEC-HMS Hydrological Model. **Water Resources Management**. p. 1–21, 2019.

YUN, X.; TANG, Q.; WANG, J.; *et al.* Impacts of climate change and reservoir operation on streamflow and flood characteristics in the Lancang-Mekong River Basin. **Journal of Hydrology**, v. 590, n. September, p. 125472, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125472>>.

ZANCHETTA, A. D. L.; COULIBALY, P. Recent advances in real-time pluvial flash flood forecasting. 2020. **Water**, v. 12, n. 570, 2020.

ZHANG, Y.; WANG, Y.; CHEN, Y.; *et al.* Projection of changes in flash flood occurrence under climate change at tourist attractions. **Journal of Hydrology**, v. 595, n. February, p. 126039, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126039>>.