

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE CURVAS-CHAVE EMPÍRICAS E SINTÉTICAS
PARA GERENCIAMENTO DE RISCOS DE INUNDAÇÕES URBANAS: O CASO
DE SÃO CARLOS, SP**

Marina Fagundes e Souza

São Carlos

2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE CURVAS-CHAVE EMPÍRICAS E SINTÉTICAS
PARA GERENCIAMENTO DE RISCOS DE INUNDAÇÕES URBANAS: O CASO
DE SÃO CARLOS, SP**

Marina Fagundes e Souza

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof. Dr. Anaí Floriano Vasconcelos

Co-orientação: Prof. Dr. Maria Clara Fava

São Carlos

2026

Souza, Marina Fagundes e

Estudo comparativo entre curvas-chave empíricas e sintéticas para gerenciamento de riscos de inundações urbanas: o caso de São Carlos, SP / Marina Fagundes e Souza -- 2026.
205f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Anáí Floriano Vasconcelos

Banca Examinadora: Priscilla Macedo Moura, Marcos Roberto Benso

Bibliografia

1. Inundações urbanas. 2. Modelos hidrológicos. 3. Curvas-chave. I. Souza, Marina Fagundes e. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Arildo Martins - CRB/8 7180



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
Departamento de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do(a) candidato(a) Marina Fagundes e Souza, realizada em 29/04/2026.

Comissão Julgadora:

~~Prof(a). Dr(a). Anaí Floriano Vasconcelos (UFSCar)~~

~~Prof(a). Dr(a). Priscilla Macedo Moura (UFMG)~~

~~Prof(a). Dr(a). Marcos Roberto Benso (USP)~~

DEDICATÓRIA

Ao professor Ademir.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por tudo.

À minha família, por todo o incentivo e suporte.

Aos meus amigos, antigos e novos, por tornar a jornada mais interessante.

Aos meus professores, pelo conhecimento e disposição.

À CAPES e ao CNPq, por financiar esta pesquisa e o projeto (processo nº 446043/2023-0).

À *CHI Water*, por disponibilizar o acesso gratuito do *PCSWMM* e por todo o suporte ao longo do desenvolvimento.

Em especial, aos professores Ademir (*in memoriam*), Anaí, Maria Clara e Marcos, essenciais durante o processo.

RESUMO

O Brasil sofre com enchentes, inundações, enxurradas e alagamentos periódicos, e algumas das causas para isso são: a ideia de que a natureza deveria se “adequar” às necessidades e vontades humanas; a urbanização e, conseqüentemente, a impermeabilização do solo urbano rápida, descontrolada e indiscriminada; a preferência histórica por soluções de “engenharia cinza”. Assim, faz-se cada vez mais necessário prever eficientemente a ocorrência de inundações. Uma grande dificuldade encontrada na realização dessas previsões, contudo, é a falta de dados de monitoramento hidrológico, especialmente dados de vazão. Métodos de obtenção sintética de curvas-chave surgem como alternativa. Esta pesquisa visa a gerar curvas-chave teóricas para corpos hídricos de São Carlos, com auxílio do *software PCSWMM*, e comparar as curvas teórica e empírica. Foram realizados: pesquisa bibliográfica, coleta e levantamento de dados, modelagem hidrodinâmica no *PCSWMM* e comparação entre as curvas-chave empíricas e sintéticas. A construção de um modelo hidrodinâmico e a geração de curvas-chave sintéticas abrem a perspectiva de melhorar o entendimento do processo de inundações urbanas. Além disso, possibilitam avançar na qualidade do gerenciamento de risco durante eventos extremos. O modelo desenvolvido por este trabalho resultou em uma curva-chave sintética capaz de representar adequadamente a dinâmica geral dos eventos, principalmente os picos e tempos de pico, ou seja, a forma do hidrograma. Entretanto, a curva tende a superestimar vazões baixas e subestimar vazões muito elevadas. Apesar disso, conclui-se que a curva-chave sintética obtida é, sim, aplicável no gerenciamento de risco de inundações urbanas.

Palavras-chave: saneamento básico, drenagem urbana, inundações urbanas, modelos hidrológicos, curvas-chave.

ABSTRACT

Brazil suffers from periodic floods, flash floods, inundations, and urban waterlogging. Some of the causes include: the notion that nature should "adapt" to human needs and desires; urbanization and, consequently, the rapid, uncontrolled, and indiscriminate sealing of urban soils; and a historical preference for "gray engineering" solutions. Thus, it is increasingly necessary to efficiently predict the occurrence of floods. A major difficulty in making such predictions, however, is the lack of hydrological monitoring data, especially flow data. Synthetic rating curve methods have emerged as an alternative. This research aims to generate theoretical rating curves for water bodies in São Carlos using PCSWMM software, and to compare theoretical and empirical curves. The study involved a literature review, data collection and survey, hydrodynamic modeling in PCSWMM, and a comparison between empirical and synthetic rating curves. The development of a hydrodynamic model and the generation of synthetic rating curves open up new possibilities for understanding urban flood processes. Furthermore, they represent progress toward improving the quality of risk management during extreme events. The model developed in this study resulted in a synthetic rating curve capable of adequately representing the overall dynamics of the events, especially the peaks and peak times—that is, the shape of the hydrograph. However, the curve tends to overestimate low flows and underestimate very high flows. Despite these limitations, it is concluded that the synthetic rating curve obtained is indeed applicable to urban flood risk management.

Keywords: basic sanitation, urban drainage, urban flooding, hydrological models, rating curves.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Estatísticas sobre o abastecimento de água por região.	2
Figura 02 - Estatísticas sobre a coleta de esgoto por região.	3
Figura 03 - Estatísticas sobre o tratamento de esgoto por região, referenciado a partir da água consumida.	3
Figura 04 - Estatísticas sobre a perda de água por região.	4
Figura 05 – Palavras-chave mais frequentes do protocolo 1, com a string de busca: (Risk* OR Hazard*) AND (Flood* OR Overflow* OR Inundation*) AND (Predict*).	16
Figura 06 – Evolução de documentos sobre o tema do protocolo 1, que trata de previsão de inundações, ao longo dos anos.	17
Figura 07 – Países que mais pesquisam sobre o tema do protocolo 1, que trata de previsão de inundações.	17
Figura 08 – Áreas de estudo com maior interesse sobre o tema do protocolo 1, que trata de previsão de inundações.	18
Figura 09 – Palavras-chave mais frequentes do protocolo 2, com a string de busca: ("Rating Curve*") AND (h*drology).	19
Figura 10 – Evolução de documentos sobre o tema do protocolo 2, que trata das curvas-chave, ao longo dos anos.	20
Figura 11 – Países que mais pesquisam sobre o tema do protocolo 2, que trata das curvas-chave.	20
Figura 12 – Áreas de estudo com maior interesse sobre o tema do protocolo 2, que trata das curvas-chave.	21
Figura 13 – Palavras-chave mais frequentes do protocolo 3, com a string de busca: ("Rating Curv*") AND (Flood* OR Overflow* OR Inundation*) AND (emp*).	22
Figura 14 – Evolução de documentos sobre o tema do protocolo 3, que trata do uso de curvas-chave em estudos de inundações , ao longo dos anos.	23
Figura 15 – Países que mais pesquisam sobre o tema do protocolo 3, que trata de curvas-chave empíricas e/ou comparação entre curvas-chave teóricas e empíricas.	23
Figura 16 – Áreas de estudo com maior interesse sobre o tema do protocolo 3, que trata de curvas-chave empíricas e/ou comparação entre curvas-chave teóricas e empíricas.	24
Figura 17 – Palavras-chave mais frequentes do protocolo 4, com a string de busca: (PCSWMM) AND (Flood* OR Overflow* OR Inundation*).	25
Figura 18 – Evolução de documentos sobre o tema do protocolo 4, que trata do uso do PCSWMM e das inundações urbanas, ao longo dos anos.	26
Figura 19 – Países que mais pesquisam sobre o tema do protocolo 4, que trata do uso do PCSWMM e das inundações urbanas.	26
Figura 20 – Áreas de estudo com maior interesse sobre o tema do protocolo 4, que trata do uso do PCSWMM e das inundações urbanas.	27
Figura 21 - Compilação dos resultados da revisão sobre a escolha entre MDT ou MDE para uso em modelagem hidrodinâmica.	36
Figura 22 - Fluxograma da metodologia.	37

Figura 23 - Mapa de localização de São Carlos.	38
Figura 24 - Microbacias de São Carlos.	39
Figura 25 - Evolução da mancha urbana de São Carlos, entre 1985 e 2023.	41
Figura 26 - Mapa de quantidade de enxurradas, alagamentos e inundações entre 2015 e 2020.	45
Figura 27 - Mapa de São Carlos, com localização dos pontos da rede de monitoramento.	50
Figura 28 - Mapa de São Carlos, com destaque nas áreas que têm seções transversais cadastradas.	53
Figura 29 - Exemplo de seção transversal.	55
Figura 30 - Ferramenta View Data.	56
Figura 31 - Mapa de sub-bacias divididas por córrego.	59
Figura 32 - Acúmulo de lixo no ponto N3 (02/12/2025).	83
Figura 33 - Seção transversal do ponto N3 em 06/02/2026.	84
Figura 34 - Mapa de exutórios.	93
Figura 35 - Mapa de sub-bacias para o modelo hidrológico.	94
Figura 36 - Mapa base do modelo hidrológico.	95
Figura 37 - Mapa de CNs para a área de estudo.	96
Figura 38 - Mapa de CNs médios ponderados por sub-bacia.	97
Figura 39 - Ranking de coeficientes de sensibilidade (SC).	102
Figura 40 - Hidrograma de PN1 para o Evento 07 (antes da calibração).	104
Figura 41 - Hidrograma do evento concatenado em N1.	107
Figura 42 - Hidrograma do evento concatenado em N2.	107
Figura 43 - Hidrograma do evento concatenado em N3.	108
Figura 44 - Hidrograma do evento concatenado em PN1.	108
Figura 45 - Hidrograma do evento concatenado em N1, com vazão de tempo seco. 111	
Figura 46 - Hidrograma do evento concatenado em N2, com vazão de tempo seco. 111	
Figura 47 - Hidrograma do evento concatenado em N3, com vazão de tempo seco. 112	
Figura 48 - Hidrograma do evento concatenado em PN1, com vazão de tempo seco. 112	
Figura 49 - Hidrograma do evento concatenado em N1, com vazão calibrada.	115
Figura 50 - Hidrograma do evento concatenado em N2, com vazão calibrada.	115
Figura 51 - Hidrograma do evento concatenado em N3, com vazão calibrada.	116
Figura 52 - Hidrograma do evento concatenado em PN1, com vazão calibrada.	116
Figura 53 - Evolução do NSE para o cenário 1 - fo1, com o evento concatenado (eventos 2, 3, 4, 5, 6 e 9).	117
Figura 54 - Evolução do NSE para o cenário 2 - fo2, com o evento concatenado (eventos 2, 3, 4, 5, 6 e 9).	118

Figura 55 - Evolução do NSE para o cenário 3 - fo3, com o evento concatenado (eventos 2, 3, 4, 5, 6 e 9).	118
Figura 56 - Evolução do NSE para o cenário 4 - fo1, com o Evento 04 para calibração.	119
Figura 57 - Evolução do NSE para o cenário 5 - fo2, com o Evento 04 para calibração.	119
Figura 58 - Evolução do NSE para o cenário 6 - fo3, com o Evento 04 para calibração.	120
Figura 59 - Hidrogramas para N1.	123
Figura 60 - Hidrogramas para N2.	124
Figura 61 - Hidrogramas para N3.	125
Figura 62 - Hidrogramas para PN1.	126
Figura 63 - Ajuste de uma curva-chave para os dados simulados do modelo.	130
Figura 64 - Comparação entre as curvas-chave empírica e sintética.	131
Figura 65 - Hidrograma comparativo para o evento Evento 04.	132
Figura 66 - Comparação das seções do ponto PN1, atual (2024) e da época do levantamento realizado por Barbassa (2024).	134
Figura 67 - Foto atual do ponto de controle PN1.	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Dados coletados.	52
Tabela 02 - Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade.	72
Tabela 03 - Classificação dos eventos de chuva segundo AMS e UK Met Office.	76
Tabela 04 - Área, CN e largura de cada sub-bacia.	97
Tabela 05 - Eventos de interesse.	100
Tabela 06 - Resultados da análise de sensibilidade.	101
Tabela 07 - Resultados de NSE na etapa de pré-calibração.	103
Tabela 08 - Classificação e tipo de evento de precipitação.	106
Tabela 09 - Vazões de tempo seco.	109
Tabela 10 - Vazões de tempo seco calibradas.	113
Tabela 11 - Resumo do NSE de cada cenário de calibração automática.	121
Tabela 12 - Resumo do NSE após ajustes.	127
Tabela 13 - Métricas de avaliação do ajuste da curva-chave sintética.	133

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMS	Sociedade Americana de Meteorologia
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
APP	Área de Preservação Permanente
ATT	Área de Transbordo e Triagem
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CN	<i>Curve Number</i>
DMAPU	Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas
GA	Algoritmo Genético
Ha	Hectares
IDW	Inverso da Distância Ponderada
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
m	Metro
m^3/s	Metro cúbico por segundo
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
Mha	Milhões de Hectares
mm	Milímetros
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NA	Nível d'Água
NVDI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas

PDD	Plano Diretor de Drenagem
PDDI	Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado
SC	Coefficiente de Sensibilidade
SEL	Sistemas de Espaços Livres
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SINISA	Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SUS	Sistema Único de Saúde
TWI	Índice de Umidade Topográfica
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
UK	<i>United Kingdom</i> (Reino Unido)
USP	Universidade de São Paulo
WSUD	Projetos Urbanos Sensíveis à Água

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2. JUSTIFICATIVA	10
1.3. OBJETIVOS	12
2. REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1. METODOLOGIA DA REVISÃO DE LITERATURA	13
2.2. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	15
2.3. REFERENCIAL TEÓRICO	28
3. MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1. FLUXOGRAMA	37
3.2. ÁREA DE ESTUDO	37
3.3. MODELAGEM HIDRÁULICO-HIDROLÓGICA	46
3.3.1. LEVANTAMENTO DE DADOS	48
3.3.1.1. DADOS NECESSÁRIOS	48
3.3.1.2. FONTES DE DADOS E DISPONIBILIDADE	49
3.3.1.3. AVALIAÇÃO DOS DADOS DISPONÍVEIS	49
3.3.1.4. COMPLEMENTAÇÃO DOS DADOS E RESULTADOS OBTIDOS	51
3.3.1.5. SELEÇÃO DE DADOS	54
3.3.2. INSERÇÃO DOS DADOS NO MODELO	55
3.3.2.1. DADOS DE DRENAGEM URBANA	55
3.3.2.2. DADOS SOBRE AS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA ÁREA DE ESTUDO E PREPARAÇÃO DA BASE	56
3.3.2.3. AJUSTES PARA MELHORIA NA ESTABILIDADE DO MODELO HIDROLÓGICO	65
3.3.2.4. ESPACIALIZAÇÃO DAS CHUVAS NAS BACIAS	65
3.3.3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	71
3.3.4. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO	73
3.3.4.1. ETAPA PRÉ-CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO	73
3.3.4.2. ETAPA DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO	74
3.3.4.3. ETAPA PÓS-CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO	86
3.4. OBTENÇÃO DA CURVA-CHAVE SINTÉTICA	89
3.5. COMPARAÇÃO COM A CURVA-CHAVE EMPÍRICA	91
3.6. ANÁLISE DE APLICABILIDADE DE CURVAS-CHAVE SINTÉTICAS PARA A PREVISÃO DE INUNDAÇÕES URBANAS	92
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	92
4.1. LEVANTAMENTO DE DADOS	92
4.2. PREPARAÇÃO DA BASE DO MODELO	93
4.3. RESULTADOS INICIAIS DA MODELAGEM	99

4.4. RESULTADOS DA ANÁLISE DOS DADOS DE CHUVA	100
4.5. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	100
4.6. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO	103
4.6.1. ETAPA PRÉ-CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO	103
4.6.2. ETAPA DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO	105
4.6.3. ETAPA PÓS-CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO	121
4.7. OBTENÇÃO DA CURVA-CHAVE SINTÉTICA	129
4.8. COMPARAÇÃO COM A CURVA-CHAVE EMPÍRICA	131
4.9. ANÁLISE DE APLICABILIDADE DE CURVAS-CHAVE SINTÉTICAS PARA GERENCIAMENTO DE RISCO DE INUNDAÇÕES URBANAS	135
5. CONCLUSÃO	138
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143
7. APÊNDICES	159
7.1. APÊNDICE 01 - TABELA RESUMO DA REVISÃO SISTEMÁTICA 01	160
7.2. APÊNDICE 02 - TABELA RESUMO DA REVISÃO DE LITERATURA 02	178

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A legislação brasileira, aqui representada pelo Marco Legal do Saneamento (Lei 14.026/2020) (Brasil, 2020), define **saneamento básico** como o conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais:

- I. De abastecimento de água potável;
- II. De esgotamento sanitário;
- III. De limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos;
- IV. De drenagem e manejo das águas pluviais urbanas.

Dentre as atividades abrangidas, estão: disponibilização, manutenção, infraestrutura e instalações operacionais.

Cada um dos quatro pilares do saneamento básico (itens I a IV) é objeto dos mais diversos temas de estudo, em diferentes áreas. Esta pesquisa trata **da drenagem e do manejo de águas pluviais urbanas** (DMAPU).

Países subdesenvolvidos, em geral, possuem infraestrutura precária e desigualdade social profunda. Conseqüentemente, o saneamento é deficitário. Em muitos desses países, a falta de moradia popular e de lotes urbanos a preços acessíveis resultou em intenso êxodo urbano. Necessitada de melhor qualidade de vida, a população vê-se desassistida e coagida a ocupar áreas de risco, acentuando as inundações. Esta situação se agrava com a emergência climática, que tem tornado eventos extremos cada vez mais intensos e frequentes (Bastos, 2009; Fava *et al.*, 2021; Morelli; Cunha, 2021; Petit-Boix *et al.*, 2015; Sofia *et al.*, 2017).

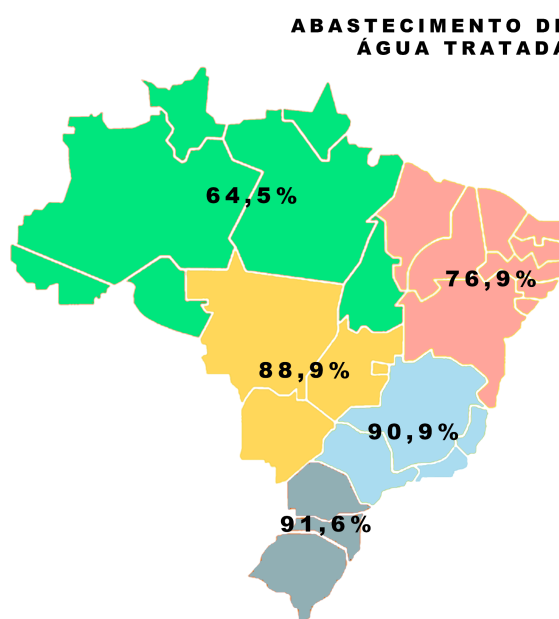
O Brasil segue essa regra. Entre 1985 e 2022, a área urbanizada brasileira passou de 1,2 milhões de hectares (Mha) para 3,7 Mha, ou seja, mais do que triplicou em menos de 40 anos. 5% desse crescimento ocorreu dentro de favelas e 3% de toda a área urbanizada brasileira se encontra em áreas de risco. Destaca-se que, dentro de favelas, o problema é ainda maior: a cada 100 hectares (ha), 16,5 ha se localizam em áreas de risco. Paralelamente, a cada 100 ha de área urbanizada,

11,3 ha são suscetíveis a inundações. Em favelas, esse número aumenta para 17,3 ha (*MapBiomias, 2023*).

Além disso, é deficitária a situação do saneamento básico no Brasil como um todo: 84,2% da população tem acesso a água potável e apenas 55,5% da população é atendida por uma rede de coleta de esgoto. Isso significa que 31 e 113 milhões de brasileiros, respectivamente, não têm acesso a rede de água e de esgoto. Ademais, apenas 52,2% do esgoto é tratado (*Instituto Trata Brasil, 2024*).

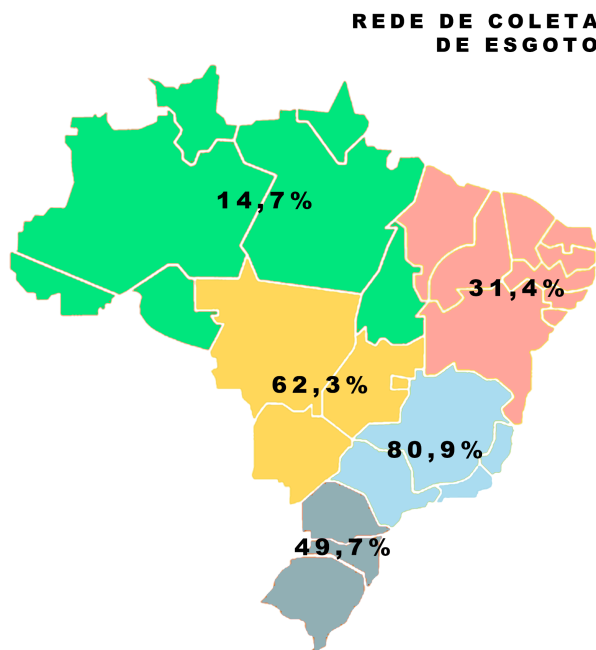
É válido notar que essa é uma média nacional. Quando discretizam-se os dados por região, a desigualdade regional se impõe: enquanto a região sudeste apresenta valores acima da média nacional (90,7% de população atendida por rede de distribuição de água; 80,8% por rede de coleta de esgoto e 61,6% de esgoto tratado), na região norte, esses valores são 62,4%, 14,3% e 19,8%, em ordem (*Instituto Trata Brasil, 2024*). Em relação às perdas no sistema de abastecimento de água potável, as porcentagens variam entre 33,9%, na região Sudeste, e 46,9%, na região Norte. As Figuras 01 a 04 apresentam um panorama sobre o saneamento básico nas regiões brasileiras.

Figura 01 - Estatísticas sobre o abastecimento de água por região.



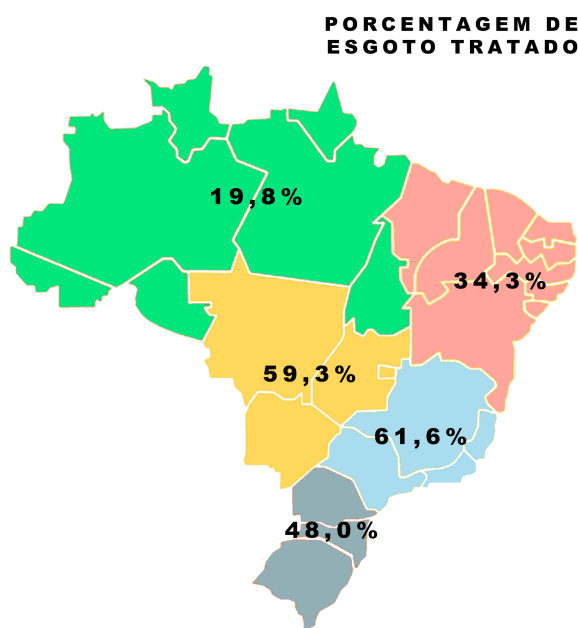
Fonte: adaptado de Instituto Trata Brasil, 2025.

Figura 02 - Estatísticas sobre a coleta de esgoto por região.

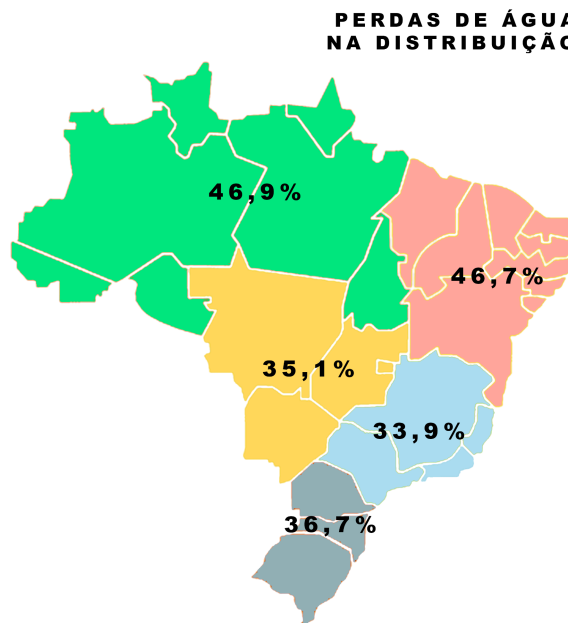


Fonte: adaptado de Instituto Trata Brasil, 2025.

Figura 03 - Estatísticas sobre o tratamento de esgoto por região, referenciado a partir da água consumida.



Fonte: adaptado de Instituto Trata Brasil, 2025.

Figura 04 - Estatísticas sobre a perda de água por região.

Fonte: adaptado de Instituto Trata Brasil, 2025.

Segundo dados do Instituto Trata Brasil (2024), entre 2005 e 2024, a variação no atendimento da rede de água foi relativamente pequena (de 81,7% para 84,2%). Por outro lado, o aumento da rede de coleta de esgoto foi significativo (de 39,5% para 55,5%). Apesar disso, se considerar-se o ritmo de crescimento e os investimentos necessários, o país não conseguirá atingir as metas de 99% de população com acesso a água tratada em suas torneiras e de 90% com acesso à rede de coleta e tratamento de esgoto, em 2033, prazo estipulado pelo Governo Federal (Abcon Sindcon, 2024). Estima-se que, no ritmo atual, as metas para água e esgoto só serão alcançadas em 2091 e 2060, respectivamente (Abcon Sindcon, 2024).

A situação da drenagem e manejo de águas pluviais urbanas também é preocupante: o levantamento do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2019), que tinha como amostra 3.653 municípios, indica que 40% dos municípios brasileiros não possuem pessoal alocado para os serviços de drenagem urbana e 30% declaram possuir entre uma e cinco pessoas, incluindo os prestadores de serviços. Apenas 38% dos municípios da amostra participam de um

comitê de bacia ou sub-bacia hidrográfica. 80% dos municípios não desenvolveram planos diretores específicos para drenagem e manejo de águas pluviais urbanas. Somente 35% dos municípios brasileiros possuem cadastro técnico do sistema de drenagem. Dentre os municípios com menos de 20 mil habitantes, esse número diminuiu para 29% (IPEA, 2022).

Paralelamente, destaca-se que as informações relativas à drenagem urbana são de mais difícil obtenção. O SNIS era preenchido com dados apresentados pelas prefeituras dos municípios, o que levava muitas administrações públicas a subnotificar eventos de enchentes, alagamentos, enxurradas e inundações. Por exemplo, a prefeitura de São Carlos, SP, informa que, entre 2015 e 2020, houve apenas cinco eventos dessa natureza no município. Esta informação não corresponde à realidade. Atualmente, o *site* do SNIS está em reconstrução, alterado para SINISA (Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico). Em janeiro de 2025, o SINISA apenas permitia acesso para a equipe técnica, o que impossibilitou o seu uso.

Apesar disso, se visto com olhar crítico, o SNIS ainda é a mais completa fonte de informações sobre drenagem urbana. O último diagnóstico disponível, relativo ao ano de 2022, indica que 2.945, dentre os 4.833 municípios participantes, apresentaram eventos hidrológicos impactantes entre 2017 e 2022. 67 municípios registraram óbitos e 694 relataram pessoas desabrigadas ou desalojadas. Calcula-se que, na área urbana brasileira, 522,4 mil pessoas ficaram desalojadas e/ou desabrigadas em consequência de eventos hidrológicos e que 2,4 milhões de domicílios estejam em situação de risco. Apesar disso, apenas 814 dos municípios possuem Plano Diretor de Drenagem (PDD), 1.606 monitoram seus dados hidrológicos em área urbana e 931 têm sistemas de alertas de riscos hidrológicos (SNIS, 2023).

Em 2022, existiam 1.290 municípios críticos em relação à ocorrência de desastres naturais no Brasil (SNIS, 2023). Entretanto, em 2024, o Ministério do Meio Ambiente (MMA) atualizou os critérios e mapeou 1.942 municípios suscetíveis a desastres associados a deslizamentos de terras, alagamentos, enxurradas e

inundações; ou seja, aproximadamente um em cada três municípios brasileiros está suscetível a esse tipo de desastre (Agência Brasil, 2024).

Já os resíduos sólidos apresentam uma estatística surpreendente: o censo do IBGE de 2022 indica que os serviços de coleta de lixo beneficiam 91% dos brasileiros. 82,5% dos moradores têm seus resíduos sólidos coletados diretamente em seus domicílios por serviços de limpeza e apenas 8,4% dos brasileiros precisam depositar seu lixo em caçambas, para ter acesso a esse serviço (Agência Brasil, 2024).

Por outro lado, o grande problema do país é a **destinação desses resíduos**. Em 2022, o Brasil destinou 33,3 milhões de toneladas de lixo de forma inadequada, de uma produção de 77,1 milhões de toneladas; ou seja, 43% de todo o resíduo sólido produzido no país teve destinação inadequada (ABREMA, 2024). Além disso, apenas 4% dos resíduos sólidos são reciclados ou reaproveitados e 40% de tudo que se produz no Brasil é destinado a lixões e aterros. Evidente, pois, a necessidade de políticas públicas e a disponibilização de infraestruturas no país, para lidar com o problema dos resíduos sólidos (Agência Brasil, 2023).

Os dados validam a afirmativa de que o saneamento brasileiro é deficitário. Isso impacta diretamente na qualidade de vida e na saúde pública de milhões de pessoas. Correia *et al.* (2021) afirmam que o Brasil, assim como outros países de menor poder aquisitivo, sofre mais com os impactos de diversas doenças de veiculação hídrica (como dengue, malária e esquistossomose). Esses males seriam controlados ou erradicados se o país apresentasse condições adequadas de saneamento. Em consequência, as doenças de veiculação hídrica não contribuiriam tanto para a atual sobrecarga do Sistema Único de Saúde (SUS).

Em 2019, o Instituto Trata Brasil constatou que o SUS gastou 108 milhões de reais com internações por doenças de veiculação hídrica. Paralelamente, o valor da economia total com a melhoria das condições de saúde dos brasileiros - devido à universalização e qualidade do saneamento básico, entre 2004 e 2016 - foi de 1,7 bilhões de reais, ou seja, 134 milhões de reais por ano. A conclusão é que investir em saneamento mais do que compensa financeiramente, além de ser imprescindível para melhorar a qualidade de vida dos brasileiros (Instituto Trata Brasil, 2020).

Destaca-se aqui a interrelação entre os diferentes pilares do saneamento básico, o que justifica a introdução de todos eles neste texto. Um exemplo simples disso é que, se a coleta de resíduos sólidos de uma cidade não for adequada, é provável que, em caso de chuva, esses resíduos sejam transportados até bocas de lobo e as entupam, o que pode causar ou agravar a ocorrência de alagamentos.

A situação do Estado de São Paulo é melhor que a média nacional. 95,1% dos paulistas têm acesso à água; 90,5% têm acesso a rede de coleta de esgoto; e 71,4% do esgoto é tratado. A capital foi a cidade com maior volume de investimentos contratados em DMAPU em 2022 (Instituto Trata Brasil, 2023). Também se nota que a principal destinação de resíduos sólidos no Estado são os aterros sanitários, alternativa aos lixões, que são uma destinação inadequada (SNIS, 2023).

Dentre os 644 municípios do Estado de São Paulo, que (TCE - SP, 2023):

- 1) 104 não possuem plano municipal de saneamento básico e de gestão integrada de resíduos sólidos;
- 2) 14 não dispõem de serviço de abastecimento e distribuição de água;
- 3) 418 desenvolveram ações e medidas preventivas de contingenciamento para períodos de estiagem, tais como busca de fontes alternativas de abastecimento, campanha de conscientização da população e desassoreamento;
- 4) 14 não dispõem de serviços de coleta de esgoto;
- 5) 355 apresentam cobertura de serviços de coleta de esgoto em 100% de sua área;
- 6) 42 não possuem serviço de tratamento de esgoto;
- 7) Um município não tem coleta de resíduos domiciliares;
- 8) A coleta de resíduos domiciliares abrange todos os bairros em 610 municípios;

- 9) 166 possuem Área de Transbordo e Triagem (ATT) para resíduos sólidos urbanos;
- 10) Em 56 municípios, não há licença de operação da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) para Área de Transbordo e Triagem de Resíduos Sólidos Urbanos;
- 11) 188 não dispõem de coleta seletiva;
- 12) 419 mapearam áreas de risco e, dentre eles:
- a) 371 fiscalizaram essas áreas em 2022;
 - b) 316 desenvolveram mecanismos para vedar novas ocupações das áreas em questão;
 - c) 279 apresentaram plano de contingência, mas somente 188 desses planos foram enviados para a Coordenadoria Estadual de Proteção e Defesa Civil do Estado de São Paulo;
 - d) 170 municípios possuem um sistema de alertas para desastres;
 - e) 99 possuem um sinal, dispositivo ou sistema de alarme para desastres;
 - f) 351 municípios mantêm a população informada sobre as áreas de risco, através do *site* da Prefeitura, de SMS, da televisão, da rádio, das redes sociais ou de outros meios;

Constata-se que a situação do saneamento básico do Estado de São Paulo, apesar de mais avançada do que a média nacional, ainda está muito aquém do necessário e esperado. Neste contexto, fica evidente a necessidade de se desenvolverem estudos relacionados ao tema para o Brasil e, especificamente, para o Estado de São Paulo.

Ao mesmo tempo, nota-se, ainda, uma evolução no número de eventos climáticos extremos e, conseqüentemente, de inundações urbanas. Tal crescimento se relaciona em especial com: **(a)** a urbanização, que causou uma intensa

impermeabilização do solo e a ocupação de áreas inadequadas; e **(b)** com a mudança climática, que tornou eventos climáticos extremos mais frequentes e mais intensos (Xu *et al.*, 2023). Imprescindível, portanto, solucionar o problema das inundações. Soluções de longo prazo, como Sistemas de Espaços Livres, alterações nos planos diretores e infraestrutura verde, são importantes, mas precisam ser acompanhadas de respostas de médio e curto prazo, uma vez que a população sofre - no presente - com inundações urbanas.

Nesse contexto de fragilidades estruturais do saneamento e de crescente exposição da população a eventos hidrológicos extremos, torna-se necessário adotar estratégias que visem não apenas à ampliação da infraestrutura, mas também à mitigação dos impactos associados às inundações. Assim, surge o gerenciamento de riscos de inundações como componente da gestão urbana, com a implementação de sistemas de alerta a serem emitidos para a população.

Esses sistemas podem ser feitos de várias formas, incluindo o emprego de ferramentas de modelagem capazes de simular o comportamento hidrológico e hidráulico dos cursos d'água. Nesse sentido, destacam-se as modelagens hidrodinâmicas, que permitem representar matematicamente a propagação de vazões e níveis d'água ao longo do sistema fluvial, subsidiando a emissão de alertas antecipados (Demeritt *et al.*, 2010).

A confiabilidade dessas simulações, contudo, depende diretamente da qualidade dos dados hidrológicos utilizados como base. Nesse contexto, a curva-chave assume um papel fundamental. Trata-se da relação empírica estabelecida entre o nível d'água (cota) observado em uma seção fluviométrica e a respectiva vazão do curso d'água, construída a partir de medições de campo. Essa relação permite converter registros contínuos de nível em estimativas de vazão, variável essencial para a modelagem e para a definição de limiares de alerta. Entretanto, a curva-chave está sujeita a diferentes fontes de incerteza, como limitações nas campanhas de medição, alterações morfológicas na seção transversal do rio, extrapolações para faixas de vazão não medidas, variabilidade hidráulica ao longo do tempo e a própria dificuldade de obtenção de dados

confiáveis. A adequada consideração dessas incertezas é essencial para a robustez das estimativas hidrológicas (Massazza *et al.*, 2019).

Não obstante o gerenciamento ser uma ação paliativa, ele é fundamental: inundações resultam, de forma recorrente, em perdas humanas e animais, além de provocarem impactos significativos sobre residências, atividades comerciais e serviços essenciais (CNM, 2022). Portanto, é primordial prever de maneira eficiente os eventos fluviométricos, para que o poder público e a população possam se preparar adequadamente para ocorrências de alagamentos, enchentes, inundações e enxurradas.

1.2. JUSTIFICATIVA

O gerenciamento de risco de inundações depende do conhecimento das vazões dos cursos d'água de interesse, mas a medição contínua dessas vazões é econômica e operacionalmente complexa (Nogueira *et al.*, 2025). Lima, Fernandes, Nascimento (2019) afirmam que os maiores desafios para realizar o monitoramento e a coleta de dados em bacias urbanas são: **(1)** altas velocidades de escoamento; **(2)** tempos de resposta curtos para eventos de enchente; e **(3)** cursos d'água canalizados e de difícil acesso para a medição e instalação dos equipamentos de monitoramento. Além disso, os altos custos de instalação, manutenção e operação de equipamentos mais avançados devem ser considerados. Lima, Fernandes, Nascimento (2019) notam que as altas velocidades de fluxo e objetos flutuantes durante fluxos médios a altos, mais comuns em áreas urbanas, também impedem o uso de determinadas técnicas de medição de vazões, o que dificulta o monitoramento.

Para solucionar esses problemas, utilizam-se as curvas-chave, que representam a relação matemática entre nível e vazão em uma estação hidrométrica e uma seção transversal específica. Tais curvas são uma das maneiras mais populares de se estimarem vazões a partir de níveis d'água de forma indireta (Nogueira *et al.*, 2025; Ocio *et al.*, 2017). Isso porque a medição de vazões em cursos d'água é bastante complexa e a utilização de curvas-chave torna possível

medir os níveis d'água e convertê-los em vazões com o uso de apenas uma equação. Ou seja, a medição contínua de nível d'água permite a estimativa quase instantânea de vazão, que não é facilmente observável durante eventos extremos. Adicionalmente, com base em vazões de referência, a curva-chave transforma esses valores em níveis d'água de alerta e emergência, que são mais eficientes de comunicar à Defesa Civil e à população.

A estimativa de vazão é importante porque esta é a variável que representa, de fato, o volume de água escoando no canal, controlando a sua capacidade e estando diretamente relacionada ao extravasamento. A vazão também permite a comparação com valores de referência, como vazões de projeto e cheias de períodos de retorno conhecidos (como Q10 e Q100), o que torna esta variável essencial para análise hidrológica e para dimensionamento de obras hidráulicas.

Existem as curvas-chave empíricas e as sintéticas. As empíricas são desenvolvidas a partir de dados de campo, bastante difíceis de serem obtidos em áreas urbanas com bacias de contribuição pequenas, onde as ondas de cheia são muito rápidas e as velocidades de escoamento comumente ultrapassam 5 m/s. Domeneghetti, Castellarin, Brath (2012) destacam que as curvas-chave empíricas apresentam incertezas relacionadas à imprecisão da medição e à natureza inerentemente variável do regime de escoamento.

Já as curvas-chave sintéticas são obtidas por meio de modelagens hidrodinâmicas. Seu uso na previsão de eventos fluviométricos é repleto de incertezas (Vieira *et al.*, 2022). Entretanto, é comum não levar essas incertezas em consideração na hora de fazer projetos urbanos ou de tentar prever eventos fluviométricos. Os impactos do detalhamento na modelagem hidrodinâmica são conflitantes. Em geral, demonstra-se que um maior número de informações geográficas impacta positivamente modelos não calibrados, mas têm consequências variáveis em modelos calibrados (Niazdi *et al.*, 2017), podendo, inclusive, ter efeito desprezível após a calibração. Esses modelos, entretanto, exigem grande poder computacional e um número elevado de dados de entrada, muitas vezes não disponíveis. Assim, é comum utilizar-se de modelos hidrológicos mais simples (semi-distribuídos como os gerados pelo *PCSWMM*, por exemplo) para a previsão

de vazões e de níveis d'água. Essa previsão permite a antecipação de condições críticas de extravasamento e viabiliza a implementação de sistemas de alerta em tempo quase real, imprescindíveis para o gerenciamento de risco de inundações urbanas.

Neste contexto, observa-se a relevância da existência das curvas-chaves para corpos hídricos urbanos no contexto do gerenciamento de risco de inundações e destaca-se que a obtenção de curvas-chave sintéticas, por meio de modelagem hidrodinâmica, é mais viável do que as curvas-chave empíricas em muitas bacias urbanas. De posse de curvas-chave empíricas e sintéticas, a comparação entre elas permite a análise dos erros associados ao uso de curvas-chave sintéticas quando comparadas às empíricas e, dessa forma, a análise de o quão adequado é utilizar essas curvas na previsão de eventos fluviométricos, como as inundações urbanas. A compreensão dos erros e inadequações aprimora o gerenciamento de riscos de inundações urbanas, possibilitando ao poder público alertar a população de maneira eficiente, prevenir e mitigar riscos e evitar a perda de vidas humanas.

1.3. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a aplicabilidade de curvas-chave sintéticas em estudos que utilizam modelagem hidrodinâmica para gerenciamento de riscos de inundações urbanas.

Para tanto, o trabalho contempla os seguintes objetivos específicos:

- 1)** Elaboração do modelo hidrodinâmico calibrado e validado;
- 2)** Geração de uma curva-chave sintética para um ponto do córrego do Monjolinho, localizado na área urbana de São Carlos;
- 3)** Avaliação dos erros associados ao uso da curva-chave sintética.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. METODOLOGIA DA REVISÃO DE LITERATURA

A revisão sistemática de literatura foi dividida em quatro temas:

- 1) Previsão de inundações urbanas;
- 2) Adequação dos modelos hidrodinâmicos para o contexto brasileiro;
- 3) Modelagem hidrodinâmica através de *softwares*;
- 4) Uso de curvas-chave para gerenciamento de inundações urbanas.

Estas questões se desdobraram em quatro análises bibliométricas, posteriormente, revisões sistemáticas. Essas revisões foram realizadas na base de dados *Scopus*, porque, entre a *Scopus*, a *Web of Science* e o portal de periódicos CAPES, a que retornou o maior número de resultados foi a *Scopus*. Verificou-se, também, que existia a duplicação de muitos documentos entre as duas primeiras bases de dados. Somado a isso, a *Scopus* oferece ótimas ferramentas de pesquisa, métricas de citação e uma interface amigável, o que justificou a preferência por esta base de dados.

Utilizou-se o *software VOSviewer* para auxiliar na análise bibliométrica através da geração de imagens de nuvens de palavras-chave que permitem a visualização do estado da arte de cada tema no mundo. Adicionalmente, o *software Zotero* possibilitou o gerenciamento de referências bibliográficas.

Para todos os temas, deu-se preferência a artigos, mas não foram excluídos documentos de outros tipos, no idioma inglês. Também não foram excluídos artigos em português ou espanhol, mas eles eram muito poucos, de modo que todos os documentos escolhidos foram em inglês.

Adicionalmente, escolheram-se apenas artigos ou documentos de acesso público. Isso porque, ao final da revisão, fez-se a leitura completa do documento. Em um primeiro momento, realizou-se o *download* dos documentos selecionados na própria base de dados da *Scopus*. A seguir, quando a *Scopus* não permitiu o *download* de alguns documentos, justamente por não serem de acesso público,

estes foram verificados manualmente, um por um, se estavam disponíveis na base de dados *Web of Science*, no portal de Periódicos CAPES ou na página *web* do próprio periódico. Nas hipóteses em que nenhuma das quatro opções permitiram o acesso, o documento foi eliminado da seleção.

Não foram aplicados filtros de período em qualquer das linhas de pesquisa, pois buscou-se analisar a evolução no interesse sobre o assunto ao longo dos anos. Além disso, termos que apareceram recorrentemente e não apresentavam relação com o tema da pesquisa foram eliminados.

Para alcançar a maior cercania possível do panorama brasileiro, a preferência de pesquisas com uma área de estudo específica foi por países subdesenvolvidos e/ou de climas semelhantes ao do Brasil, tendo em vista a escassez de estudos de pesquisadores brasileiros ou que se situam no país. A identificação desses países foi realizada através da leitura do título, resumo e, apenas se necessário, da metodologia.

Por fim, nos temas que retornaram mais de duzentos resultados, foram analisados os duzentos resultados mais citados sobre o assunto. Com isso, buscou-se escolher os documentos que geraram as maiores contribuições e tendências nas respectivas áreas de interesse.

As *strings* de busca para as revisões sistemáticas realizadas foram:

1. (Risk* OR Hazard*) AND (Flood* OR Overflow* OR Inundation*) AND (Predict*)

Procurou-se analisar os avanços no gerenciamento de riscos de inundações urbanas, focando: na previsão de tais eventos, em quais novas tecnologias estão sendo empregadas, em quais os problemas e desafios principais na área. Além disso, foram analisados estudos de caso sobre o assunto, com preferência para países subdesenvolvidos e/ou com condições climáticas semelhantes às do Brasil.

2. ("Rating Curve*") AND (h*drology)

A escolha consistiu em realizar uma análise bibliométrica para curvas-chave no geral. Como retornaram muitos resultados que não estavam dentro do escopo da

pesquisa, adicionou-se o termo *h*drology* para o seu melhor direcionamento. Também foram utilizados os filtros de área: Engenharia Ambiental e Ciência Ambiental. Adicionalmente, realizou-se uma pesquisa rápida adicionando o termo *bra*il*, para focar no contexto do país. Entretanto, o número de documentos retornados foi pequeno, então optou-se por retirar essa palavra-chave.

O principal objetivo foi pesquisar sobre incertezas e erros de modelagens hidrodinâmicas, principalmente em curvas-chave teóricas, e, se possível, encontrar estudos comparativos entre curvas-chave teóricas e empíricas.

3. ("Rating Curv*") AND (Flood* OR Overflow* OR Inundation*) AND (emp*)

Esta pesquisa visou a encontrar estudos que utilizam curvas-chave empíricas e/ou comparam curvas-chave teóricas e empíricas, discutindo erros e incertezas associados à modelagem hidrodinâmica.

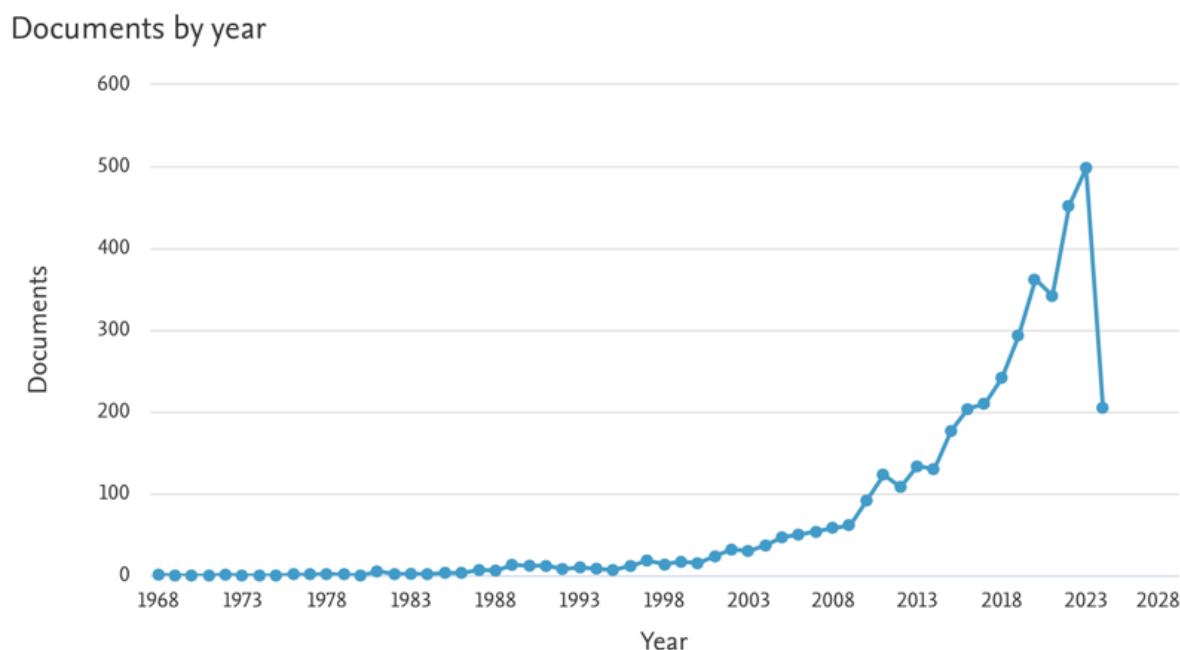
4. (PCSWMM) AND (Flood* OR Overflow* OR Inundation*)

Esta foi a linha de pesquisa mais específica, pois ela procurou documentos que relacionam inundações urbanas e o uso do *PCSWMM*, *software* escolhido para a realização desta pesquisa.

2.2. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

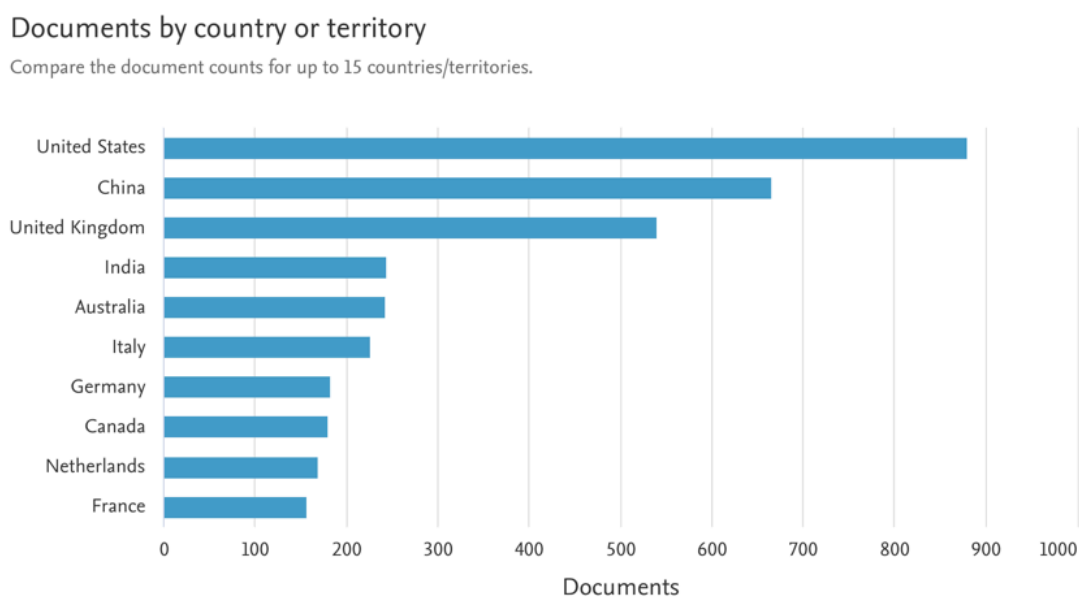
A pesquisa ocorreu entre março e abril de 2024. Por tal razão, o número de textos em 2024 de todos os protocolos é baixo em relação aos anos anteriores. No total, foram avaliados quinhentos e trinta e dois documentos (inicialmente divididos em duzentos do protocolo 1, oitenta e sete do protocolo 2, duzentos do protocolo 3 e quarenta e cinco do protocolo 4) dos quais selecionaram-se, após leitura do título, resumo e palavras-chave, cinquenta documentos para uma leitura aprofundada: dezesseis do protocolo 1, seis do protocolo 2, doze do protocolo 3 e dezesseis do protocolo 4. Dentre eles, após uma segunda etapa de leitura, cinco artigos foram eliminados, seja por não se referirem ao tema da pesquisa ou por abordarem um assunto muito específico. As Figuras 05 a 20 apresentam os resultados de cada uma das análises bibliométricas.

Figura 06 – Evolução de documentos sobre o tema do protocolo 1, que trata de previsão de inundações, ao longo dos anos.



Fonte: elaborada pela autora, através da base de dados *Scopus*, 2024.

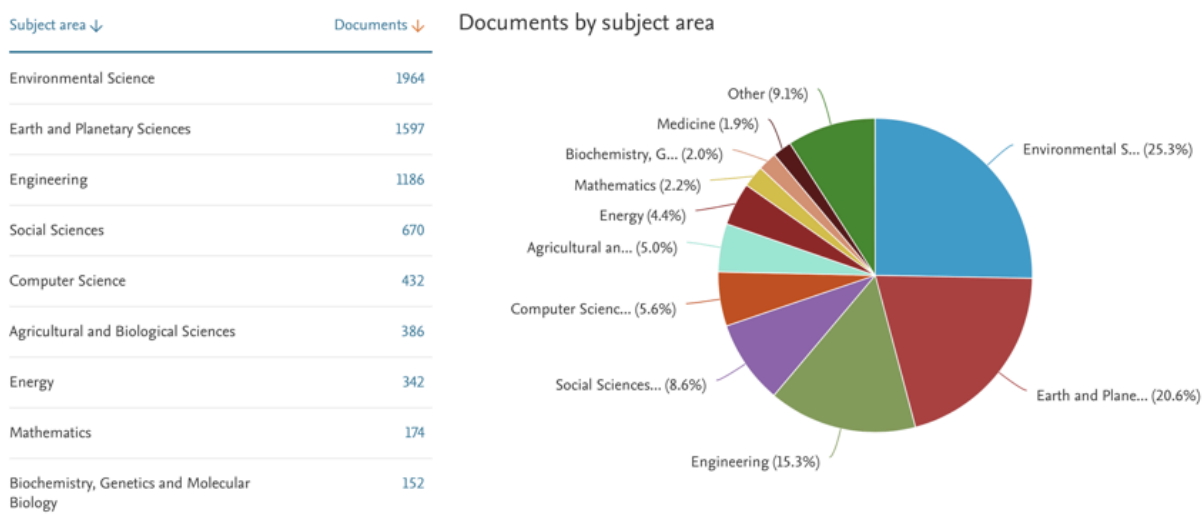
Figura 07 – Países que mais pesquisam sobre o tema do protocolo 1, que trata de previsão de inundações.



Fonte: elaborada pela autora, através da base de dados *Scopus*, 2024.

Na base de dados *Scopus*, os países se referem aos locais de afiliação declarados por todos os autores. Ou seja, uma publicação pode estar listada como pertencente a mais de um país.

Figura 08 – Áreas de estudo com maior interesse sobre o tema do protocolo 1, que trata de previsão de inundações.

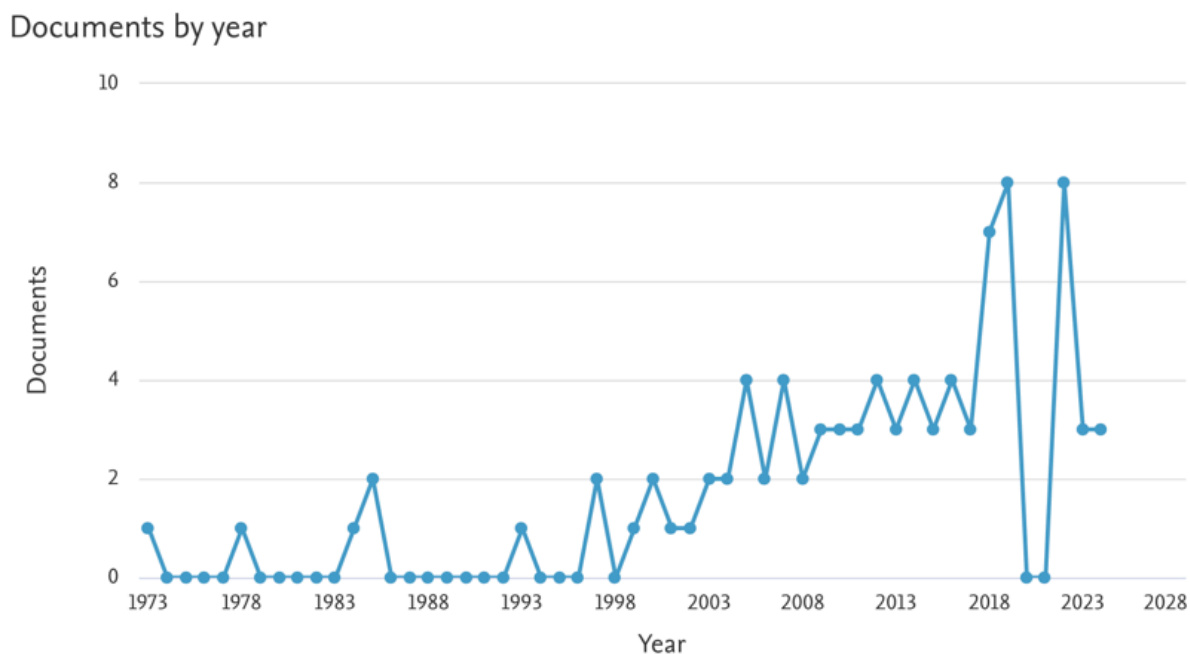


Fonte: elaborada pela autora, através da base de dados *Scopus*, 2024.

Nota-se que as áreas de estudo listadas na base de dados *Scopus* são as áreas de estudo do periódico no qual o artigo foi publicado.

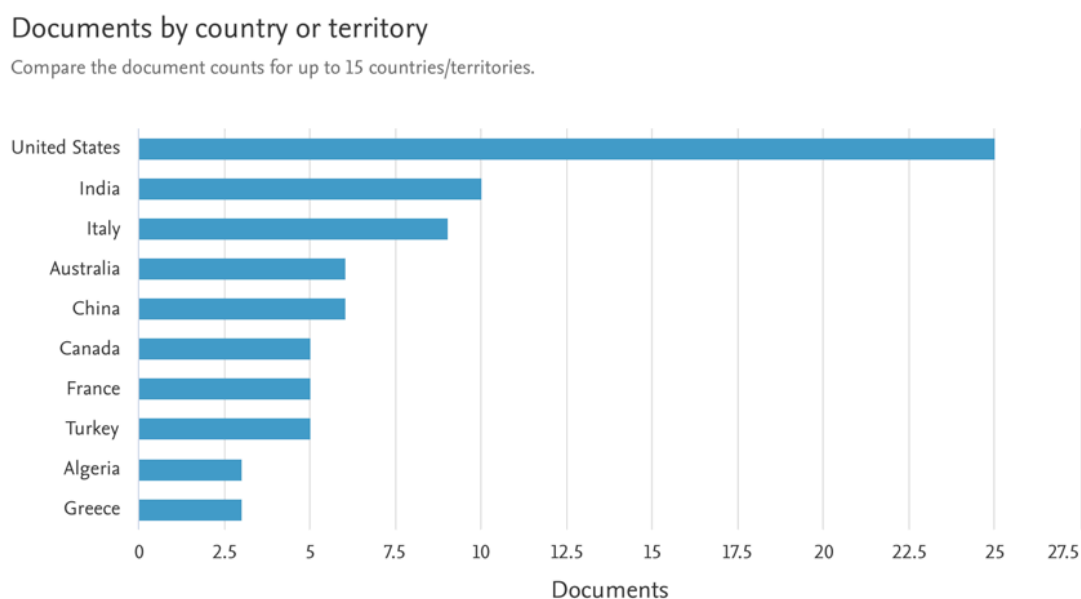
No protocolo 1, cuja *string* de busca é “(Risk* OR Hazard*) AND (Flood* OR Overflow* OR Inundation*) AND (Predict*)”, destaca-se a maior presença de palavras-chave relacionadas à mudança climática, previsão, riscos/suscetibilidade e algumas ferramentas utilizadas (*GIS*, *HEC-RAS*, redes neurais, entre outras). A primeira pesquisa publicada foi em 1968, mas nota-se que, principalmente desde 2008, o número de publicações aumentou consideravelmente. Países desenvolvidos, no geral, têm um maior número de publicações na área, mas a Índia e a China têm mostrado um interesse crescente no assunto. As três áreas de periódicos que mais publicam são: Ciências Ambientais, Ciências da Terra e Planetárias e Engenharia.

Figura 10 – Evolução de documentos sobre o tema do protocolo 2, que trata das curvas-chave, ao longo dos anos.



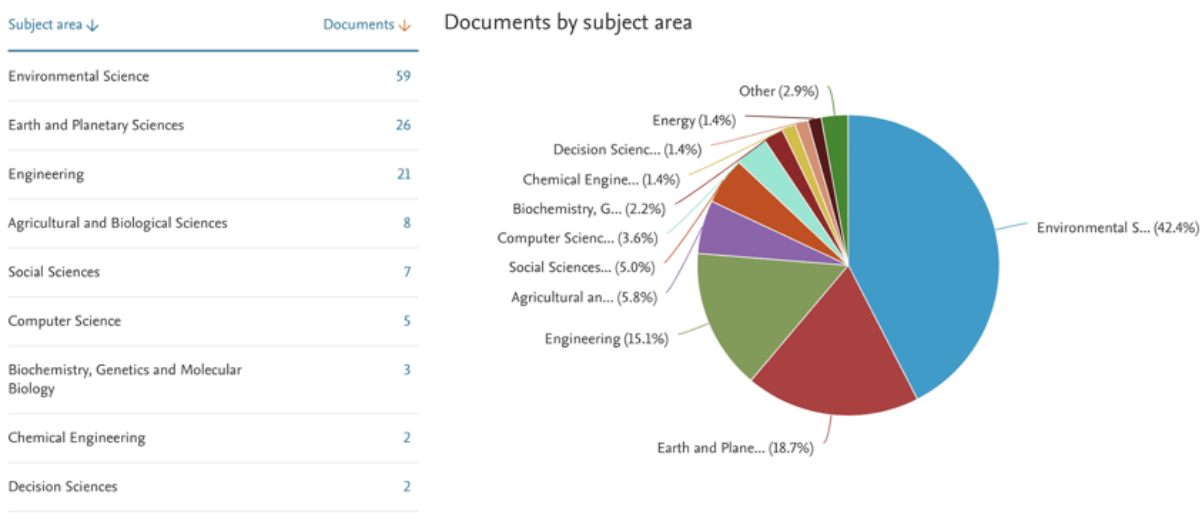
Fonte: elaborada pela autora, através da base de dados *Scopus*, 2024.

Figura 11 – Países que mais pesquisam sobre o tema do protocolo 2, que trata das curvas-chave.



Fonte: elaborada pela autora, através da base de dados *Scopus*, 2024.

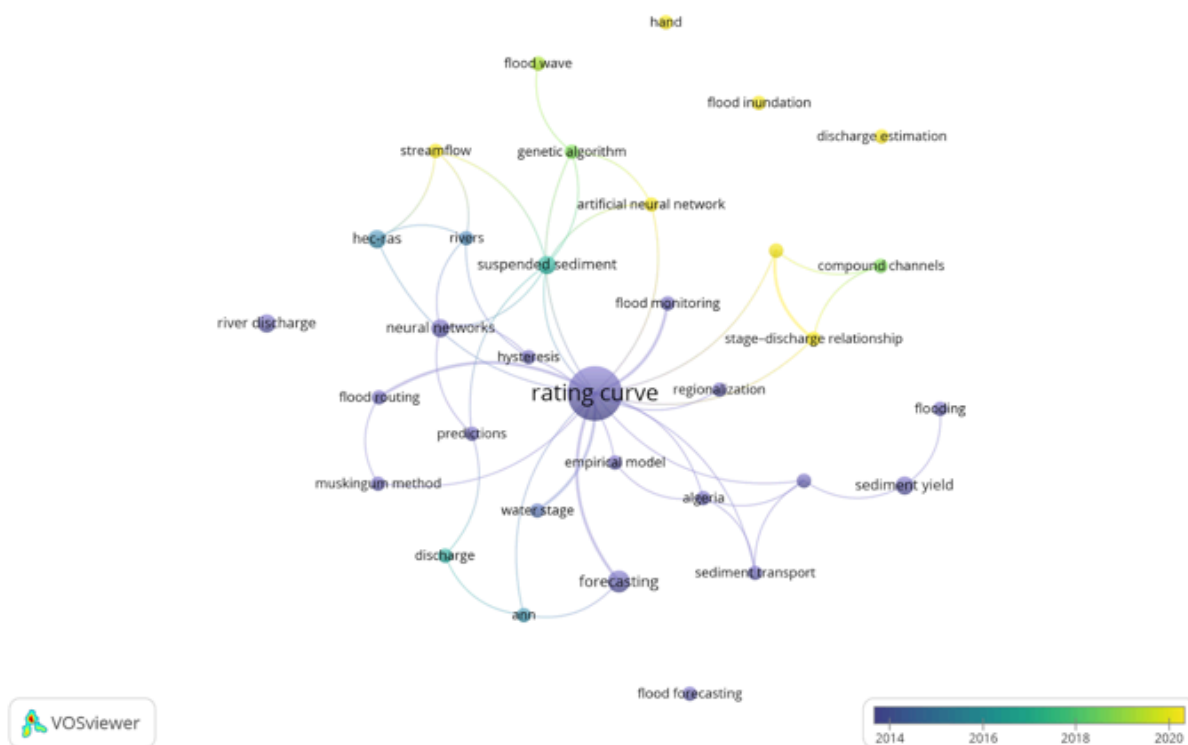
Figura 12 – Áreas de estudo com maior interesse sobre o tema do protocolo 2, que trata das curvas-chave.



Fonte: elaborada pela autora, através da base de dados *Scopus*, 2024.

No protocolo 2, cuja *string* de busca é “(“Rating Curve”) AND (h*drology)”, destaca-se a maior presença de palavras-chave relacionadas à curva-chave, descarga, escoamento, incerteza e algumas ferramentas utilizadas (modelos hidrológicos, *Landsat*, modelo *HAND*, entre outros). A primeira pesquisa publicada foi em 1973, mas vê-se que, principalmente desde os anos 2000, houve o aumento do número de publicações. Novamente, países desenvolvidos, no geral, têm um maior número de publicações na área, mas a Índia e a China têm uma quantidade relevante de publicações. As três áreas de periódicos que mais publicam também são: Ciências Ambientais, Ciências da Terra e Planetárias e Engenharia.

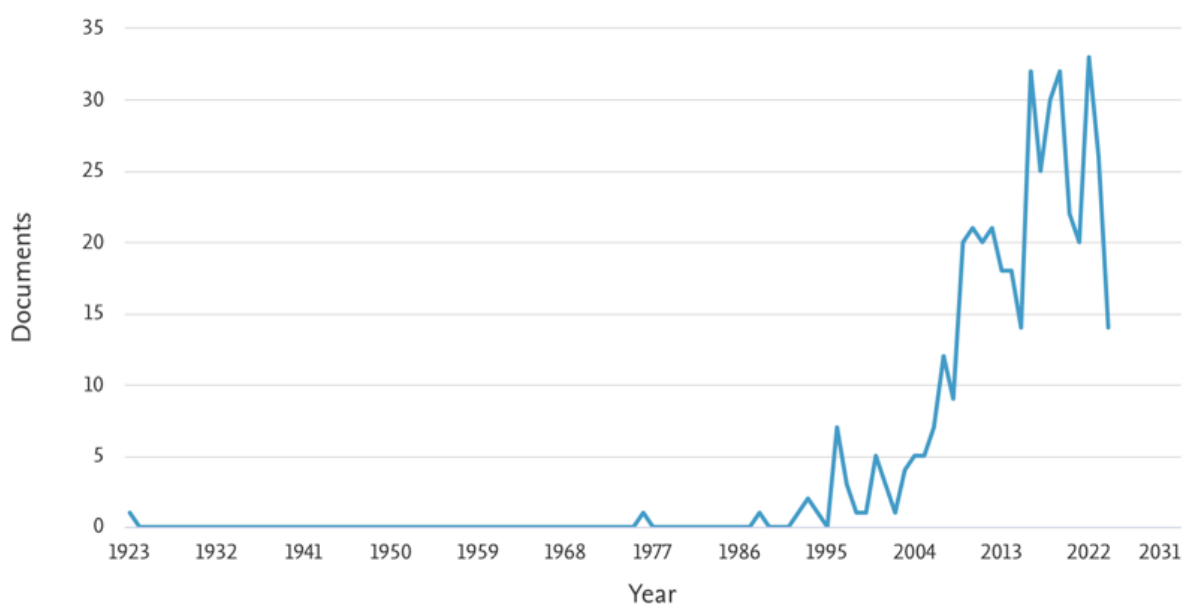
Figura 13 – Palavras-chave mais frequentes do protocolo 3, com a *string* de busca: ("Rating Curv*") AND (Flood* OR Overflow* OR Inundation*) AND (emp*).



Fonte: elaborada pela autora, com o auxílio do *software* VOSViewer, 2024.

Figura 14 – Evolução de documentos sobre o tema do protocolo 3, que trata do uso de curvas-chave em estudos de inundações , ao longo dos anos.

Documents by year

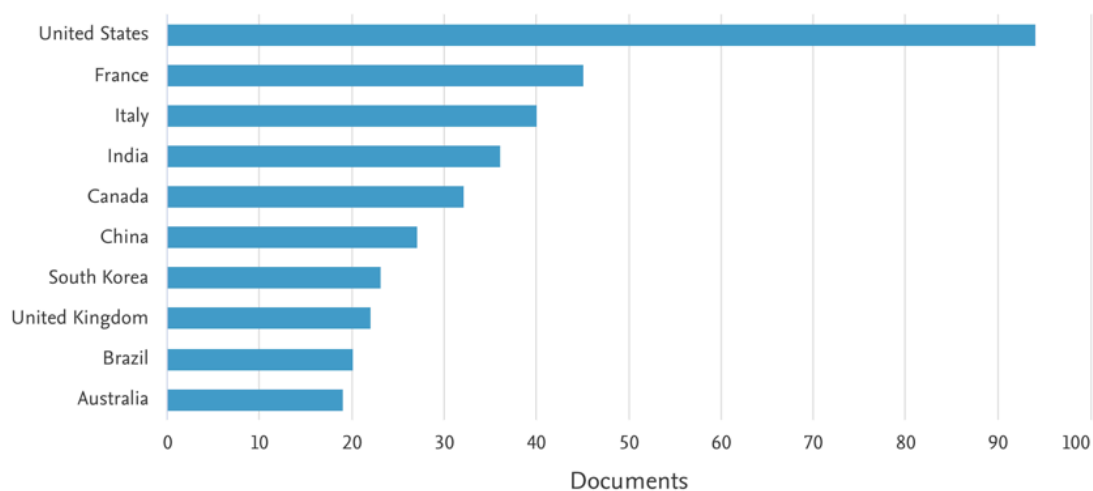


Fonte: elaborada pela autora, através da base de dados *Scopus*, 2024.

Figura 15 – Países que mais pesquisam sobre o tema do protocolo 3, que trata de curvas-chave empíricas e/ou comparação entre curvas-chave teóricas e empíricas.

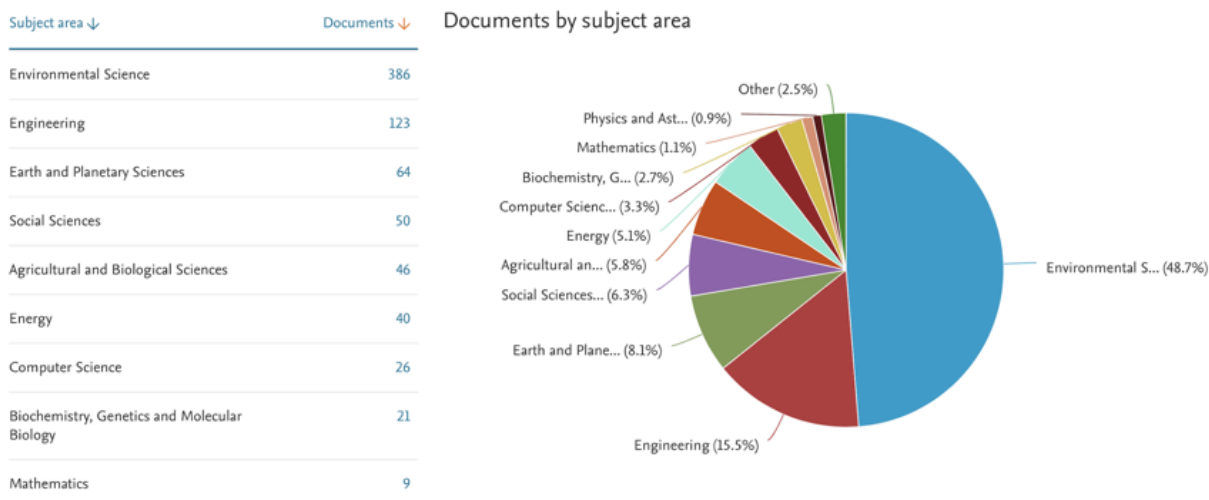
Documents by country or territory

Compare the document counts for up to 15 countries/territories.



Fonte: elaborada pela autora, através da base de dados *Scopus*, 2024.

Figura 16 – Áreas de estudo com maior interesse sobre o tema do protocolo 3, que trata de curvas-chave empíricas e/ou comparação entre curvas-chave teóricas e empíricas.

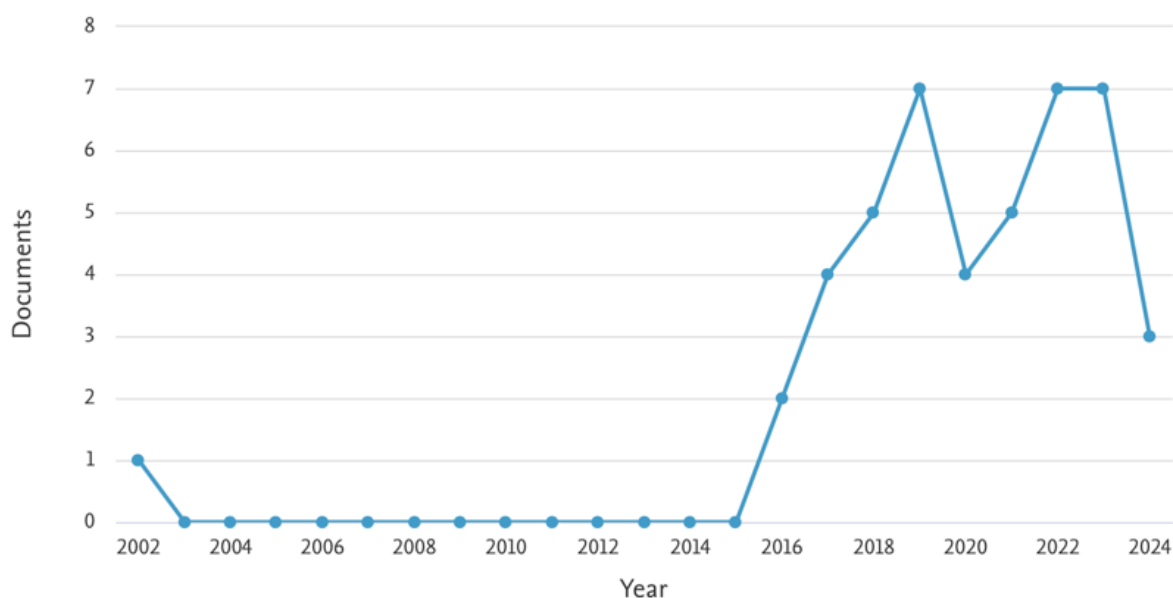


Fonte: elaborada pela autora, através da base de dados *Scopus*, 2024.

No protocolo 3, cuja *string* de busca é *("Rating Curv*") AND (Flood* OR Overflow* OR Inundation*) AND (emp*)*, destaca-se a maior presença de palavras-chave relacionadas à curva-chave, previsão, sedimentos e algumas ferramentas e/ou técnicas utilizadas (*HEC-RAS*, algoritmo genético, modelo *HAND*, entre outros). A primeira pesquisa publicada foi em 1923, configurando-se como a publicação mais antiga entre as levantadas; mas nota-se que, principalmente desde os anos 1990, houve o aumento do número de publicações. Países desenvolvidos, no geral, têm um maior número de publicações na área, mas a Índia, a China e o Brasil também possuem um número relevante de publicações. É interessante observar que, apesar dos protocolos de busca 2 e 3 tratarem de curvas-chave, o protocolo 3 retornou muito mais documentos, mesmo sendo mais detalhado. Esta diferença trouxe ainda destaque aos estudos na área que vêm sendo realizados no Brasil, visto que o país surgiu como um dos países que mais publicam na área. Este achado destaca a importância do estudo de inundações e da utilização de curvas-chave no Brasil, em consonância com o tema desta dissertação. As três áreas de periódicos que mais publicam também são: Ciências Ambientais, Engenharia e Ciências da Terra e Planetárias.

Figura 18 – Evolução de documentos sobre o tema do protocolo 4, que trata do uso do *PCSWMM* e das inundações urbanas, ao longo dos anos.

Documents by year

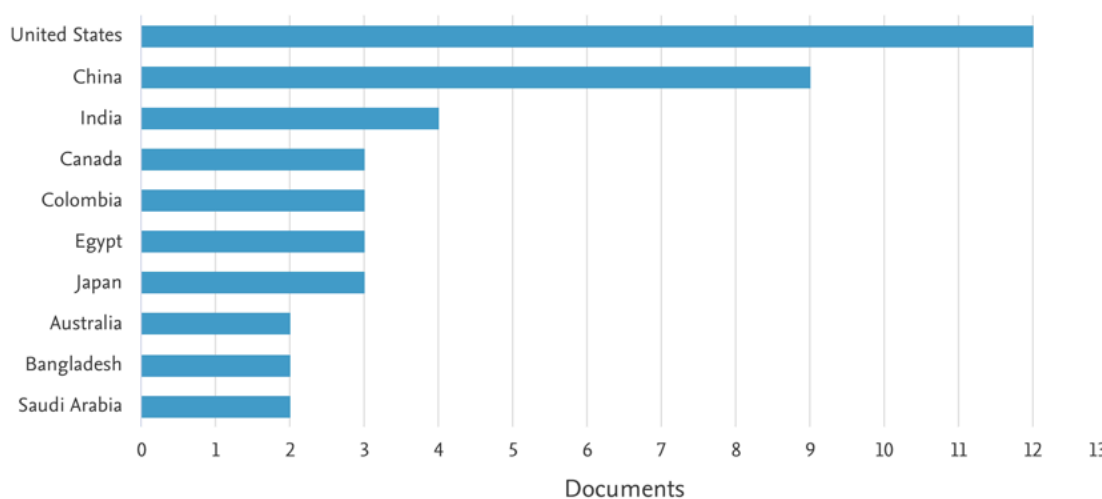


Fonte: elaborada pela autora, através da base de dados *Scopus*, 2024.

Figura 19 – Países que mais pesquisam sobre o tema do protocolo 4, que trata do uso do *PCSWMM* e das inundações urbanas.

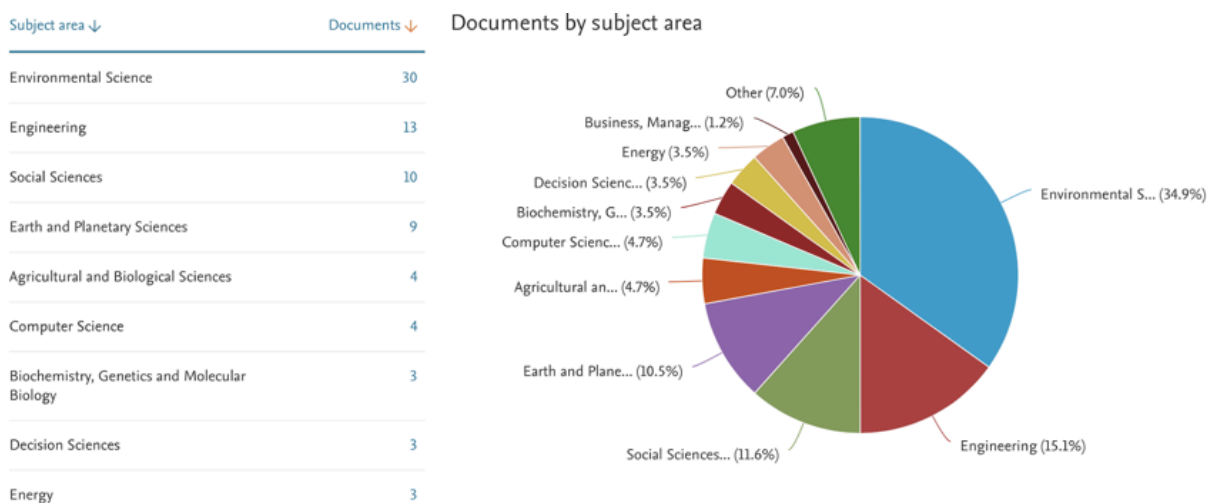
Documents by country or territory

Compare the document counts for up to 15 countries/territories.



Fonte: elaborada pela autora, através da base de dados *Scopus*, 2024.

Figura 20 – Áreas de estudo com maior interesse sobre o tema do protocolo 4, que trata do uso do *PCSWMM* e das inundações urbanas.



Fonte: elaborada pela autora, através da base de dados *Scopus*, 2024.

No protocolo 4, cuja *string* de busca é “(*PCSWMM*) AND (*Flood** OR *Overflow** OR *Inundation**)”, destaca-se a maior presença de palavras-chave relacionadas ao *PCSWMM*, enchentes urbanas, enxurradas, gestão de águas pluviais e algumas ferramentas e/ou técnicas utilizadas (modelagem 1D-2D, *SWMM*, *HEC-RAS*, entre outros). A primeira pesquisa publicada foi em 2002, configurando-se como o tema mais recente entre os levantados; mas nota-se que, principalmente desde 2015, houve o aumento do número de publicações. Isso, provavelmente, está relacionado à evolução na tecnologia e, conseqüentemente, na modelagem dos últimos anos.

Tanto o *SWMM*, versão gratuita e a base do *software*, quanto o *PCSWMM* são programas antigos, lançados, respectivamente, em 1971 e 1984 (*CHI Water*, 1996). Ou seja, o aumento de publicações nos anos 2000 não está relacionado ao lançamento dos programas, e supõe-se que, caso o termo pesquisado fosse *SWMM*, a *string* de busca retornaria mais publicações. A escolha por pesquisar sobre o *PCSWMM*, contudo, deve-se ao fato que esse foi o *software* selecionado para a modelagem, o que será justificado nas seções seguintes.

Países desenvolvidos, no geral, têm um maior número de publicações na área, mas esse é o tema com maior presença de países em desenvolvimento entre os que mais publicam. As três áreas de periódicos que mais publicam são: Ciências Ambientais, Engenharia e Ciências Sociais.

Chama atenção o fato de que todos esses temas ganharam destaque nos últimos anos e que, apesar de os Estados Unidos ainda serem o país que mais publica, há a participação significativa de países do Sul Global, em especial a China e a Índia, no número de publicações. Inclusive, no protocolo 4, os dois autores com maior número de publicações são chineses.

Na tabela apresentada no Apêndice 01, estão presentes os resultados da revisão sistemática de literatura, que lista todos os cinquenta artigos selecionados, bem como um resumo de seus materiais e métodos, resultados e discussões; uma classificação relativa sobre a adequabilidade para a pesquisa em questão e a razão para essa classificação. O item (2.3) resume os resultados compilados pela tabela do Apêndice 01.

2.3. REFERENCIAL TEÓRICO

A partir da revisão sistemática, é possível criar um referencial teórico sobre estratégias de gerenciamento de risco de inundação ao longo do tempo, em diferentes partes do mundo. É igualmente possível criar um referencial teórico da importância das curvas-chave e, especialmente, da consideração de incertezas na previsão de risco de inundações.

A mudança climática global e a urbanização têm afetado os eventos de precipitação e escoamento superficial nos últimos anos, tornando as enchentes os desastres socioambientais mais comuns do mundo (Xu *et al.*, 2023). Entretanto, ainda é difícil fazer com que a população relacione a maior frequência e intensidade dos eventos com a emergência climática. Ogunbude *et al.* (2019) afirmam que suportar um evento extremo não levou as pessoas a verem os perigos das mudanças no clima. Essa associação só ocorreu quando as pessoas já faziam a conexão direta entre o evento e a emergência climática.

Ullah, Zhang (2020) listam alguns fatores causais e desencadeadores de inundações: elevação, declividade, densidade de drenagem, uso e cobertura do solo, curvatura e chuvas.

Os avanços tecnológicos, como a incorporação do uso de *softwares* (Al-Sabhan *et al.*, 2003) e de redes neurais profundas (Ghanghas *et al.*, 2022), criaram ferramentas para a elaboração de modelos hidrodinâmicos precisos, complexos e que permitem simulações e análises de cenários.

É importante notar, a partir das imagens geradas pelo *VOSViewer*, que o gerenciamento de risco de inundações é um tema antigo de pesquisa, mas que ganha maior atenção com a ocorrência cada vez mais frequente de eventos extremos por causa de mudanças climáticas. O mesmo se repete no estudo de curvas-chave e de suas incertezas, que é realizado há vários anos. Respectivamente, os artigos mais antigos nas duas áreas são de 2003 (Al-Sabhan *et al.*, 2003) e 1993 (Chung *et al.*, 1993). O advento de novas ferramentas tecnológicas para modelagem e simulação fez com que o interesse pelo tema crescesse exponencialmente e, por conseguinte, causou a elaboração de modelos mais completos e complexos.

Essa evolução permitiu a melhoria do gerenciamento de risco de inundações, buscando reduzir os prejuízos em vidas humanas e em danos econômicos. Uma das estratégias utilizadas é a elaboração de modelos hidrodinâmicos para apoiar o desenvolvimento de um sistema de alertas antecipado de inundações, ou seja, que permita ao poder público se preparar e tomar decisões adequadas para prevenir e mitigar os danos (Demeritt *et al.*, 2010).

Dentre outras estratégias citam-se: análise, acompanhada ou não de previsão, de danos materiais (Pappenberger *et al.*, 2015; Jamali *et al.*, 2018); crivo de aplicação de soluções baseadas na natureza (Kumar *et al.*, 2020); modelagem para monitoramento e previsões rápidas de risco de inundações (Xu *et al.*, 2023); mapeamento probabilístico de planícies de inundação (Baldassarre *et al.*, 2010), melhorias na estabilidade de modelos (Almeida *et al.*, 2011); associação entre modelo de tempestade e modelo 2-D de inundações (Brown; Spencer; Moeller, 2007).

Alfieri *et al.* (2018) identificaram os principais desafios para a criação de uma plataforma eficiente de gerenciamento de risco de inundações urbanas: referência de tempo e frequência de atualização; tempo de validade; resolução espacial; formato de dados e tipo de produto; *upload* e *download* de dados; interoperabilidade entre produtos e serviços; e, por fim, avaliação da performance. Os autores se referiam a uma rede global, mas os mesmos desafios se replicam em escalas menores.

Emerton *et al.* (2016) citam como desafios a serem superados: capacidades atuais; melhoria da disponibilidade de dados; parametrização dos modelos; melhoria das previsões de precipitação e de evaporação; incorporação de influências antropogênicas; recursos e custos; comunicação efetiva de previsões; e avaliação e intercomparação de previsões. Além disso, os autores destacam a importância de continuar desenvolvendo estratégias adaptativas de modelagem, previsão de longo alcance, previsão de inundações repentinas, técnicas de grande conjunto e novas possibilidades de dados.

Merz *et al.* (2015) também estudam os fatores “surpresa” na avaliação e no gerenciamento de riscos, citados a seguir: complexidade do sistema (não linearidade; interdependência e processos de retroalimentação; não estacionariedade) e vieses cognitivos (pensamento positivo; optar pelo caminho de menor conflito; percepção seletiva; viés de disponibilidade; viés de recência; viés de correlação ilusória; confiança excessiva; viés retrospectivo; e viés de confirmação).

Merz *et al.* (2014) destacam a importância de estender os limites do sistema, entender os processos dominantes, quantificar o papel da variabilidade natural, integrar o risco a aspectos sociais e organizar a troca global de dados e conhecimento.

Para a realização destes estudos, a modelagem hidrodinâmica é muito utilizada e o *PCSWMM* configura-se como uma importante ferramenta. Cada autor apresenta a sua especificidade e o seu uso:

- 1) Xu *et al.* (2020) consideraram a mudança climática e as incertezas hidrológicas para a modelagem hidrológica urbana;

- 2) Xu *et al.* (2023) utilizaram o modelo no *PCSWMM* como base para o modelo *LightGBM*, com o objetivo de prever inundações urbanas rápidas. Chitwatkilsiri *et al.* (2022) combinaram o *PCSWMM* com um novo sistema *RTFlood* (para previsão em tempo real de inundações) para a previsão de inundações rápidas;
- 3) Pinos, Timbre (2019) compararam modelos hidrodinâmicos gerados por diversos *softwares*, dentre eles o *PCSWMM*, e realizaram o mapeamento de manchas de inundação. Zanchetta, Coulibaly (2022) usaram o *PCSWMM* para a geração de mapas de inundações rápidas;
- 4) Munir, Ahmad, Hafeez (2019) integraram o modelo do *PCSWMM* e do *HEC-RAS 5.x* para o monitoramento de respostas a inundações rápidas;
- 5) Knight *et al.* (2021) usaram o modelo do *PCSWMM*, principalmente, para a simulação de cenários com infraestrutura verde e análise de tráfego. Similarmente, Lu, Qin, Jun (2017) analisaram os impactos de adoção de Projetos Urbanos Sensíveis à Água (*WSUD*);
- 6) Sidek *et al.* (2021) usaram o *PCSWMM* para a simulação de inundações que ocorreram seis anos antes da publicação do estudo;
- 7) Perez *et al.* (2024) usaram o modelo para gerar mapas de risco para pedestre;
- 8) Yang *et al.* (2019) usaram o modelo hidrodinâmico do *PCSWMM* para a análise de alagamentos, e não de inundações;
- 9) Liwanag *et al.* (2018) combinaram as tecnologias SIG (para processar dados de entrada), a curva RIDF (para gerar diferentes cenários de tempestades de projeto) e o *PCSWMM* (para simular inundações urbanas), com o objetivo de identificar áreas inundáveis e prever a influência da impermeabilização no comportamento hidrológico da bacia;

10) A partir do modelo do *PCSWMM*, Banjara *et al.* (2024) geraram mapas com previsões de mudança no uso e cobertura do solo e analisaram os impactos dessas mudanças no fluxo de água. Anos antes, Akhter, Hewa (2016) usaram o *PCSWMM* para avaliar o impacto de mudanças no uso do solo em respostas hidrológicas e a performance de infraestruturas verdes.

O levantamento e a leitura de publicações introduziram algumas das possibilidades de uso do *PCSWMM*, confirmando a adequação da escolha desse *software* para a modelagem a ser realizada neste estudo.

Quando se trata de curvas-chave, as incertezas devem ser consideradas. Vieira *et al.* (2022) abordaram as incertezas de curvas-chave e seu impacto na análise de frequências de inundações. Este, curiosamente, é um dos dois estudos publicados no Brasil, dentre os cinquenta levantados. Neppel *et al.* (2010) agruparam os erros em duas categorias: erros randômicos relacionados à leitura do nível d'água e erros sistemáticos relacionados à superestimação ou subestimação de curvas-chave. Franchini, Galeati (2000) abordaram as incertezas e realizaram a comparação entre três modelos: Geomorfoclimático, Estocástico e Empírico, concluindo que todos os modelos permitem a construção satisfatória de curvas de depleção observadas. Pan, Wang, Xi (2015) destacaram que, uma vez que utilizaram três tipos de dados (MDE, batimetria do rio e imagens *Landsat TM*), os erros e incertezas desses mesmos três tipos de dados contribuem para os erros nas curvas-chave elaboradas. Ganghas *et al.* (2022) citaram os erros de batimetria e de correlação com as características de bacias e córregos diferentes.

A análise de incertezas pode ser complexa e não economicamente viável (Baldassere; Claps, 2011). Baldassere, Montanari (2009) afirmam que modelos hidrológicos frequentemente ignoram as incertezas relacionadas aos dados de vazão. Isso, principalmente, porque muitas vezes os modeladores não conseguem avaliar precisa e quantitativamente a confiabilidade dos dados de vazão e de precipitação. É difícil isolar diferenças relacionadas a aspectos metodológicos (Kiang *et al.*, 2018) e identificar autocorrelações (Sikorska; Renard, 2017). A quantidade e a qualidade de dados e medições podem tornar necessárias simplificações

(Rampinelli; Knack; Smith, 2020). Adicionalmente, curvas-chave podem passar por mudanças súbitas e/ou mudanças ao longo do tempo (Mansaranez *et al.*, 2019), o que dificulta ainda mais a avaliação de incertezas.

Steinbakk *et al.* (2015) concluíram que, na maioria dos casos, séries de dados mais longas e medições diretas adicionais de vazões reduzem o grau de incerteza e de extrapolação. Westerberg *et al.* (2015) destacaram que, apesar de informações hidráulicas contribuírem para a diminuição das incertezas, elas devem ser detalhadas e investigadas. Steinbakk *et al.* (2015) exemplificam com uma situação: uma observação de cheia anual máxima elevada pode, se combinada com um alto grau de extrapolação, introduzir vieses na estimativa dos tempos de retorno, pois a estimativa se baseia na combinação de duas distribuições altamente assimétricas.

Entretanto, a análise de incertezas é essencial para a implementação de alertas rápidos e eficientes para a população (Massazza *et al.*, 2019). Essa análise também serve como indicativo do tamanho e tipo de melhorias potenciais para um sistema de previsões em tempo real quando os erros são reduzidos (Ocio *et al.*, 2016).

Infelizmente, o número de estudos que têm como área de interesse o Brasil é pouco significativo, apesar de o país sofrer constantemente com as consequências de enchentes e inundações urbanas. Por isso, é essencial a aplicação desse tipo de estudo para o contexto brasileiro, visando a preparar o país para eventos climáticos extremos, proteger sua população e auxiliar o poder público, na medida do possível, a minimizar as consequências negativas de tais eventos.

Em suma, é possível constatar que os temas das inundações urbanas e curvas-chave são cada vez mais pesquisados, principalmente desde os anos 2000. Todavia, publicações sobre o uso do *software PCSWMM* e aplicação no contexto brasileiro são escassas, demonstrando que ainda há muitas possibilidades a serem exploradas, dentre elas, o tema desta pesquisa.

Cada protocolo de busca teve o seu papel nesta pesquisa:

- 1) O protocolo 1 foi essencial para o levantamento das tendências e práticas de gerenciamento de risco de inundações urbanas, como modelagem hidrológica

(Demeritt *et al.*, 2010), sistemas de alertas de inundações (Alfieri *et al.*, 2018), incorporação de incertezas e do “fator surpresa” (Merz *et al.*, 2015) e mapeamento de inundações (Ullah; Zhang, 2020). Além disso, destaca-se o uso de SIG (Ullah; Zhang, 2020) e o impacto da emergência climática no gerenciamento. A ferramenta mais citada para o gerenciamento de risco de inundações foi justamente a modelagem hidrológica;

- 2) O protocolo 2 buscou analisar a relação entre as curvas-chave e a hidrologia, visando a um maior conhecimento sobre curvas-chave de maneira geral. Já neste protocolo, nota-se a importância de se considerarem incertezas nas curvas-chave teóricas para se obterem produtos de qualidade;
- 3) Semelhante ao anterior, o protocolo 3 também aborda as incertezas em curvas-chave. Entretanto, enquanto o protocolo 2 foca em curvas-chave e a sua importância na hidrologia, o protocolo 3 enfatizou o uso de curvas-chave no gerenciamento de risco de inundação, bem como a comparação entre curvas-chave empíricas e teóricas, sempre considerando os erros e as incertezas;
- 4) O protocolo 4 foca no uso do *software PCSWMM* para a modelagem hidrológica, além de explicar os seus diversos usos. Essa pesquisa objetivou levantar se o *software* seria adequado para a pesquisa proposta.

Todos esses protocolos foram combinados e colaboraram com o embasamento teórico desta pesquisa que visa avaliar a aplicabilidade de curvas-chave sintéticas em estudos que utilizam modelagem hidrodinâmica para gerenciamento de riscos de inundações urbanas, utilizando, para a modelagem, o *software PCSWMM*.

Adicionalmente, ao longo do desenvolvimento da pesquisa, fez-se necessário realizar uma quinta revisão de literatura, mais simplificada, a fim de responder a uma das primeiras questões essenciais para se iniciar o modelo: a base do arquivo no *software PCSWMM* deveria ser um Modelo Digital de Terreno (MDT), um Modelo Digital de Elevação (MDE) ou um Modelo Digital de Superfície (MDS)?

Ao final dessa revisão da literatura, as seguintes definições de El-Sheimy (2005 *apud* Silveira, Silveira, 2016) foram adotadas:

- 1) **Modelo Digital de Elevação (MDE)**: refere-se aos valores altimétricos do terreno, considerando objetos existentes (por exemplo, edificações e arborização);
- 2) **Modelo Digital de Terreno (MDT)**: refere-se aos valores altimétricos do terreno, desconsiderando os objetos existentes na superfície.

Vale ressaltar: não há uso metódico e sistemático desses termos. Existem autores, como Croneborg (2020), para quem MDE é um termo geral para dados batimétricos e/ou altimétricos em diferentes formas; o MDT usa o MDE como ponto de partida, mas também considera aspectos (como a elevação de características topográficas importantes do terreno e pontos de mudança e linhas de quebra que são espaçados irregularmente) para caracterizar com mais precisão a forma do terreno. Há ainda o MDS, também representando a elevação de construções, árvores e outras feições acima do terreno. Outros, como Balasubramanian (2017), veem o MDE como um subconjunto do MDT, que representa outros elementos topológicos. Finalmente existem autores - como Croneborg (2020) destaca - que usam MDE e MDT como sinônimos. Isso gera confusão na leitura de vários artigos, porque nem todos explicitam qual definição foi adotada durante o desenvolvimento.

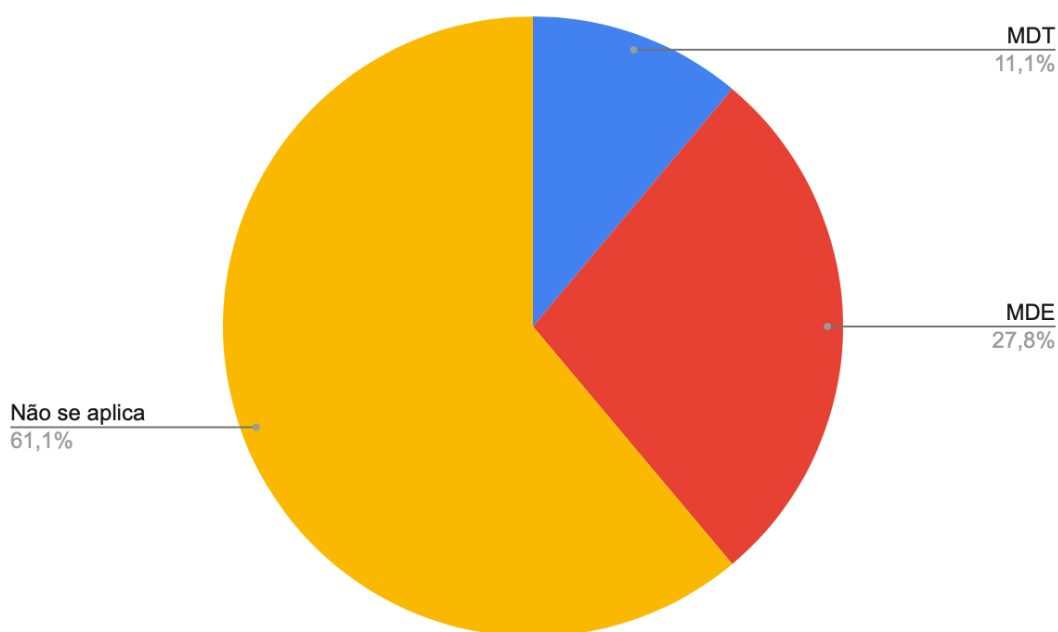
Para contornar essa limitação, realizou-se um levantamento de textos que, pelo título e pelo resumo, poderiam abordar o assunto. Isso resultou em dezoito textos, que incluíam livros, artigos científicos e até mesmo apresentações de slides de professores universitários. Devido à dificuldade de encontrar publicações específicas sobre o tema, a base de dados *Scopus* e o próprio *Google* foram utilizados.

A segunda etapa desta pesquisa foi identificar se os autores defenderam um ou outro tipo de modelo, quando destinados para a modelagem hidrodinâmica e previsão de inundações urbanas. Os resultados foram compilados no **Apêndice 02**.

Devido a confusão entre os termos, mencionada anteriormente, ou ao fato de não abordarem a modelagem hidrodinâmica, muitos dos textos não se aplicam. Os

percentuais de textos que usam os diferentes termos estão resumidos no gráfico da Figura 21.

Figura 21 - Compilação dos resultados da revisão sobre a escolha entre MDT ou MDE para uso em modelagem hidrodinâmica.



Fonte: elaborado pela autora, 2024.

Após essa etapa, conclui-se que tanto o MDT como o MDE são usados em modelagem hidrodinâmica. Há alguns anos, o MDT era predominante, em especial porque as tecnologias que captavam a superfície de construções, árvores e outros elementos eram deficientes. Porém, o cenário atual se alterou: novas tecnologias tornaram o MDE mais eficiente e mais preciso, possibilitando-lhe a expansão de seu uso para diferentes finalidades. Além disso, o MDE consegue expressar o impacto dos edifícios na linha de fluxo e as alterações na velocidade do fluxo causadas por esses edifícios.

Então, baseados principalmente em Jeong *et al.* (2023) e Chowdury (2023), foi adotado o entendimento de que o Modelo Digital de Elevação é capaz de representar o terreno com maior precisão em áreas urbanas, o que o torna mais adequado para a modelagem hidrodinâmica que se deseja realizar.

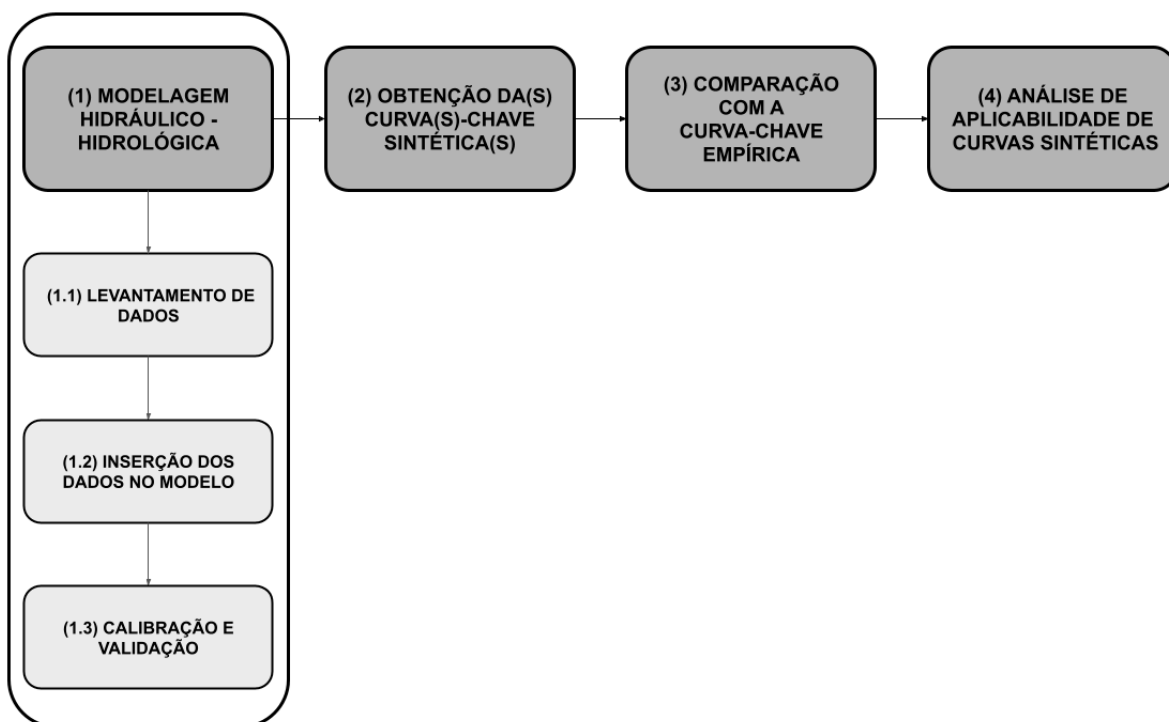
Os resultados abordados neste item remetem às tabelas dos **Apêndices 01 e 02**.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. FLUXOGRAMA

A metodologia deste trabalho é composta de quatro etapas principais, e está resumida na Figura 22. Cada etapa será discutida nas seções (3.3) a (3.6).

Figura 22 - Fluxograma da metodologia.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

3.2. ÁREA DE ESTUDO

O município de São Carlos foi definido como área de estudo. Localizado no interior do estado de São Paulo, Brasil, caracteriza-se como uma cidade de médio porte. O Município de São Carlos abriga uma população de 254.857 pessoas. 79,87

km^2 de seus $1.126,907 km^2$ correspondem à área urbanizada (IBGE, 2023). A Figura 23 mostra a localização da cidade.

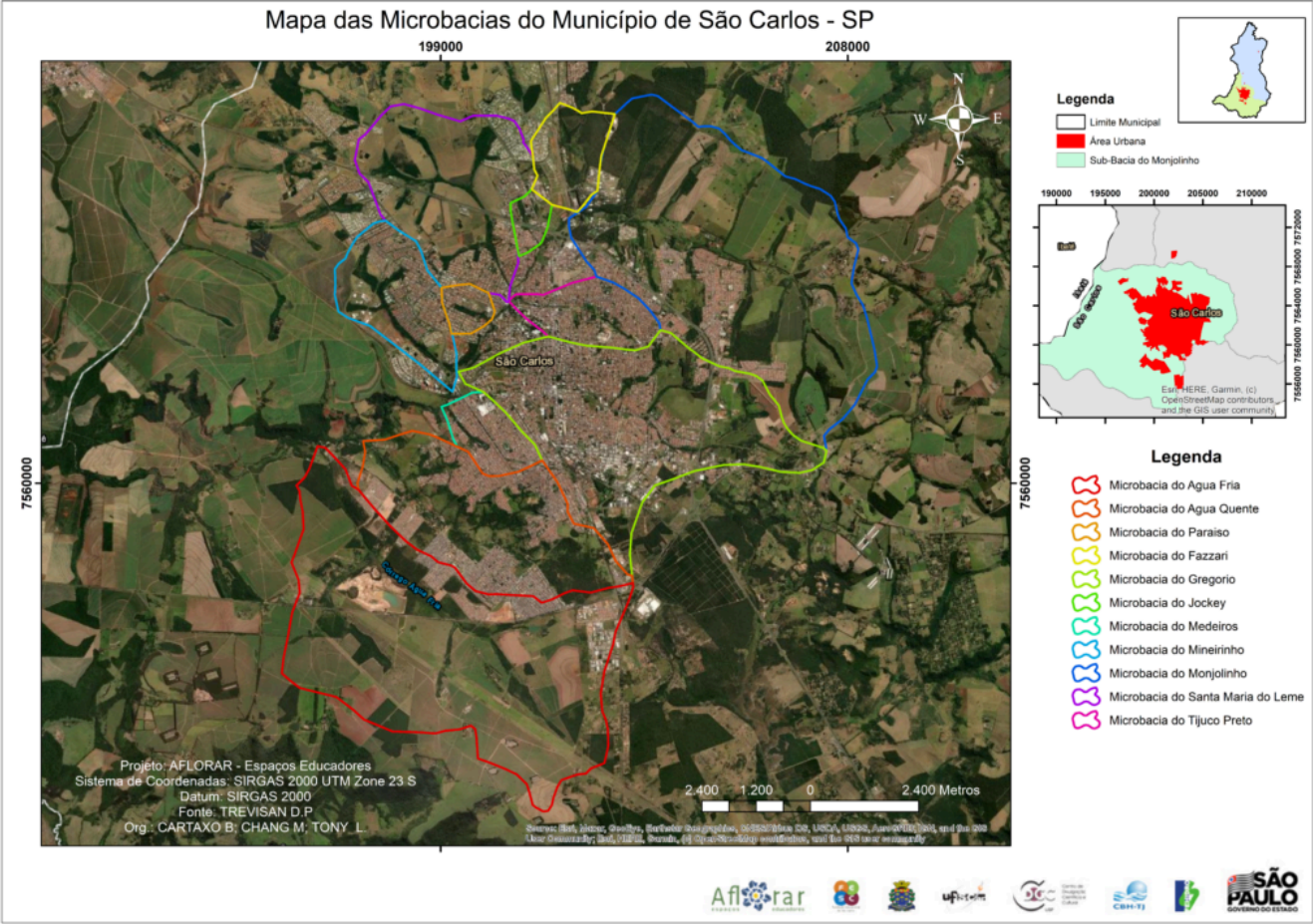
Figura 23 - Mapa de localização de São Carlos.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

São Carlos é formada por dez microbacias: Água Fria, Água Quente, Cancã, Feijão, Gregório, Medeiros, Mineirinho, Monjolinho, Santa Maria do Leme e Tijuco Preto. À exceção da microbacia do Feijão, as demais integram a bacia hidrográfica do Monjolinho. A Figura 24 apresenta as microbacias pertencentes a essa bacia.

Figura 24 - Microbacias de São Carlos.



Fonte: Projeto AFLORAR - Espaços Educadores.

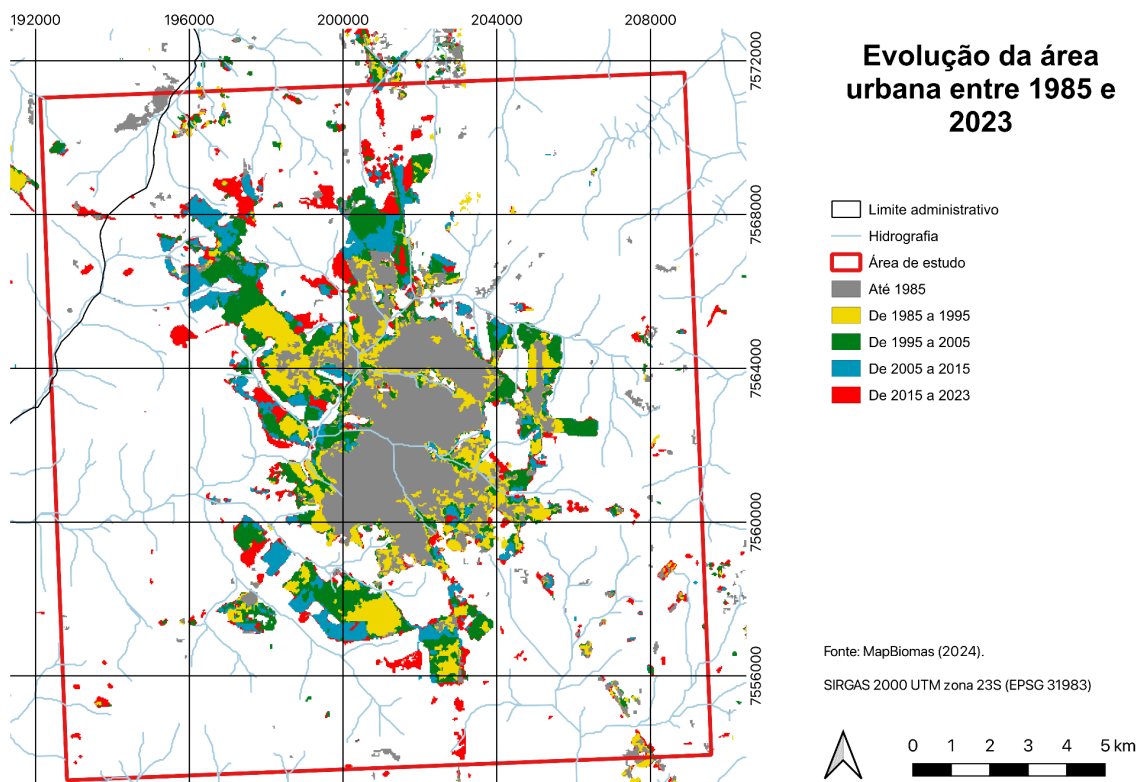
Os corpos d'água urbanos nascem em São Carlos. Com exceção do Monjolinho, todos eles também terminam na cidade. Isso deveria facilitar, e muito, a resolução de problemas de drenagem urbana, uma vez que não é necessário realizar articulações com outras prefeituras para uma solução conjunta.

São Carlos é conhecida como capital nacional da tecnologia. A cidade abriga duas grandes Universidades, a de São Paulo (USP) e a Federal de São Carlos (UFSCar). Ambas contêm grupos de pesquisa ligados às áreas de hidrologia, saneamento e urbanismo. Essas Universidades produzem um grande volume de estudos sobre o problema das inundações urbanas ocorrentes em São Carlos.

Apesar disso, enxurradas, inundações, enchentes e alagamentos persistem em São Carlos como importantes problemas urbanos até os dias atuais, o que demonstra o descompasso entre a produção acadêmica e a resolução de problemas.

São Carlos, tal qual diversas outras cidades espalhadas pelo mundo, tem a sua história interligada a corpos hídricos. O início de sua ocupação legal ocorreu nas margens do córrego do Gregório, no final do século XVIII, a partir da abertura de uma trilha cujo destino era as minas de ouro em estados da região Centro-Oeste (IBGE, 2023; Fava *et al.*, 2021). Considera-se que o ano de 1857 marcou a fundação da cidade (IBGE, 2023). O mapa da Figura 25 se refere à evolução da área urbana no período entre 1985 e 2023, para o qual dados estão disponíveis no *site MapBiomas* (2025).

Figura 25 - Evolução da mancha urbana de São Carlos, entre 1985 e 2023.



Fonte: elaborado pela autora, com base nos dados do *MapBiomas*, 2025.

Entre 1857 e os anos 1930, São Carlos recebeu um alto fluxo de imigrantes europeus. A partir de 1920, a crise do café resultou no aumento do número de fábricas, que, por sua vez, atraiu a população, antes rural, para as cidades (Faustino; Silva, 2016; Lima, 2012).

Até a década de 1940, o crescimento da cidade se concentrou nas bacias do Gregório, majoritariamente, e do Tijuco Preto. A bacia do Monjolinho também foi ocupada, mas não de forma expressiva. Os anos 1940 foram caracterizados pela urbanização em torno do núcleo urbano já estabelecido. Acontecimento importante foi a instalação do *Campus I* da USP em 1948, às margens do córrego do Tijuco Preto. Isso contribuiu para o crescimento significativo da ocupação nessa bacia (Faustino; Silva, 2016; Lima, 2012).

A década de 1950 teve como marca a reestruturação da rodovia Washington Luís, que interligou São Carlos com outras cidades importantes da região, como Araraquara e São Paulo. Este eixo se tornou a principal via de transporte, tanto de pessoas quanto de mercadorias. Iniciou-se, portanto, o declínio das ferrovias e a ascensão do rodoviarismo na região e no Brasil. A ocupação nas bacias do Gregório, do Tijuco Preto e do Monjolinho se intensificou (Faustino; Silva, 2016; Lima, 2012).

O rodoviarismo e a popularização do automóvel possibilitaram a expansão do território e o espraiamento da mancha urbana, em contraponto ao padrão anterior de ocupação adensada em torno do núcleo central (Faustino; Silva, 2016; Lima, 2012). Consequentemente, entre as décadas de 1950 e 1970, São Carlos cresceu expressivamente, em especial nas direções Norte e Sul. Ao Norte, a ocupação chegou às margens da rodovia Washington Luís e atingiu, especialmente, as bacias Santa Maria do Leme, Monjolinho e Tijuco Preto. Ao Sul, São Carlos cresceu em direção ao Água Quente e ao Medeiros. A ocupação no sentido Oeste não foi expressiva, mas destaca-se que, nas direções Leste e Noroeste, a mancha urbana alcançou as margens do córrego Lazzarini (Leste) e a vertente direita do Mineirinho (Noroeste). Esse processo resultou em uma redefinição do padrão urbano, que foi acompanhado da criação de normas legais e urbanísticas (Faustino; Silva, 2016; Lima, 2012).

Entre as normas mencionadas anteriormente, está o Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado (PDDI), aprovado em 1968. Este plano buscou concentrar o crescimento em torno do núcleo urbano central, que já possuía a infraestrutura necessária. Entretanto, de 1971 a 1977, observa-se o surgimento dos loteadores especulativos, que empreendiam fora dos padrões urbanísticos vigentes. Por fim, em 1977, foi criada a lei municipal 7821, que permitia a alteração do perímetro urbano a cada novo loteamento (Faustino; Silva, 2016; Lima, 2012).

Isso, somado aos avanços do setor automobilístico, alterou os padrões de deslocamento e de habitação e normalizou o fato de pessoas viverem longe de seus locais de trabalho e do centro da cidade. Em consequência, a área urbana de São Carlos cresceu exponencialmente (Faustino; Silva, 2016; Lima, 2012).

A década de 1970 foi marcada pela periferização e pela ocupação fragmentada em todos os setores da cidade. As bacias mais impactadas, porém, foram: Monjolinho, Santa Maria do Leme, Tijuco Preto, Medeiros e Gregório. As bacias do Tijuco Preto e do Medeiros ultrapassaram a marca de 90% de área ocupada, durante esse período (Faustino; Silva, 2016; Lima, 2012).

É importante destacar que esse novo modelo de urbanização espraiada e fragmentada contribuiu, ao longo das décadas, para a precarização da infraestrutura de São Carlos. Em outras palavras, a cidade cresceu mais rápido do que o poder público foi capaz de acompanhar, o que resultou em bairros e assentamentos com condições inadequadas de infraestrutura (Schenk; Fantin; Peres, 2015).

A década de 1980 configura-se como a continuação dos padrões observados nos anos 1970. As regiões mais ocupadas foram a Norte e a Sul, nas bacias do Monjolinho, Santa Maria do Leme, Mineirinho, Água Quente e Água Fria (Faustino; Silva, 2016; Lima, 2012).

Entre 1990 e 2002, o crescimento da mancha urbana se concentrou nas regiões Oeste, Noroeste e Nordeste, nas bacias do Monjolinho e do Mineirinho. Em 1997, foi inaugurado um *Shopping* na bacia do Mineirinho, o que transformou a bacia em um vetor de crescimento (Faustino; Silva, 2016; Lima, 2012).

Em 2005, houve uma mudança de paradigma importante: a aprovação do novo Plano Diretor do Município de São Carlos, que surgiu em contraposição à lógica do espraiamento e da urbanização acelerada e sem formas efetivas de controle (Faustino; Silva, 2016; Lima, 2012). Porém, agudizaram o conflito da cidade com a água: as décadas de um modelo predatório de urbanização, somadas à falta de planejamento sistêmico de espaços livres, à intensa impermeabilização do solo e à preferência histórica por soluções de engenharia cinza (como piscinões, tamponamento e canalização de córregos).

Os eventos causados por chuvas se tornaram mais intensos e mais frequentes com o passar dos anos. De 482 eventos de risco, no período entre 1965 e 2016, cadastrados e estudados por Eiras (2017), apenas 17 (3,5%) ocorreram antes de 1970. A partir do ano 2000, aconteceram 370 (76,3%) desses eventos.

Destaca-se que 311 dentre esses eventos de risco (64,5%) estão relacionados a inundações, enchentes e alagamentos.

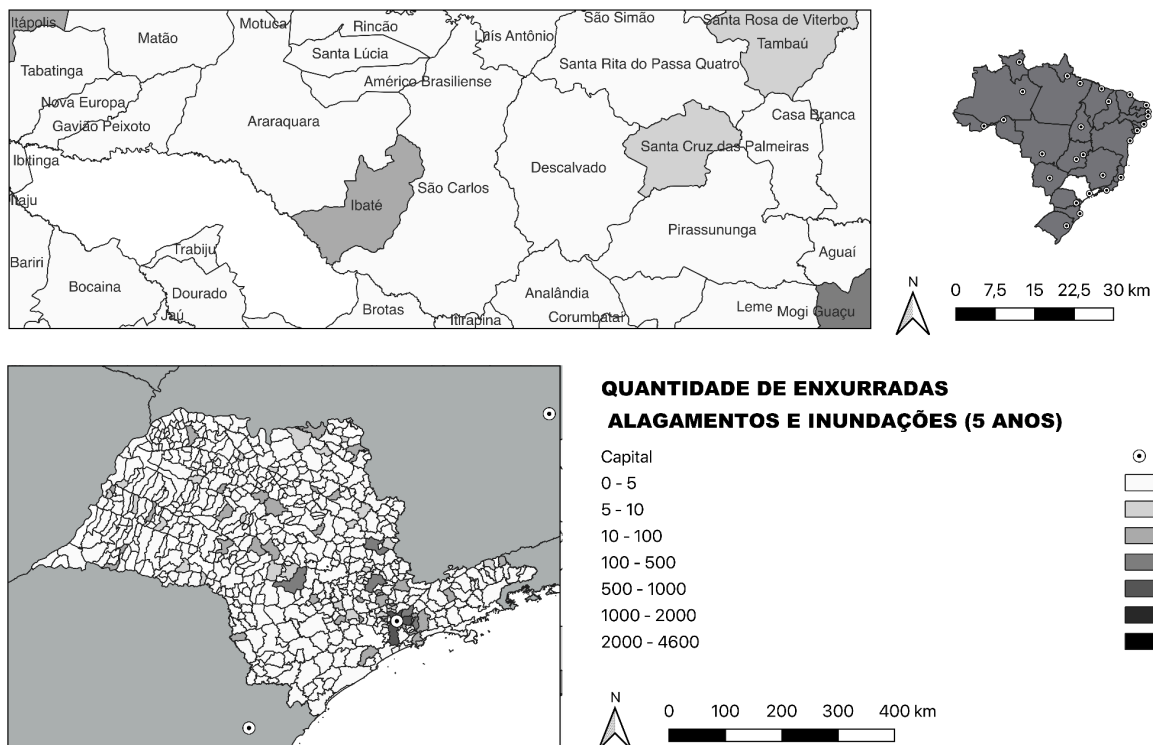
A maioria das microbacias de São Carlos sofreu com as consequências dessas alterações de uso e ocupação do solo. A bacia do Gregório é a mais crítica de todas, concentrando 119 dos 208 casos de inundações e enchentes entre 1965 e 2016 (Eiras, 2017), ou seja, 57% das ocorrências.

O encontro entre as bacias do Monjolinho, Santa Maria do Leme e Tijuco Preto registra inundações desde a década de 1990. Já o encontro entre o Monjolinho, Mineirinho e Gregório, onde se localiza a “Rotatória do Cristo”, é o segundo ponto que mais apresenta enchentes e inundações, perdendo apenas para a região do Mercado Municipal, na bacia do Gregório (Faustino; Silva, 2016; Lima, 2012). A bacia do Medeiros, apesar de altamente urbanizada, descarrega no Monjolinho à jusante dos pontos críticos, resultando em baixas pressões sobre as áreas de inundações. Destaca-se, porém, que tais pressões foram apenas transferidas para outras localidades (Faustino; Silva, 2016; Lima, 2012). Na bacia do Água Quente, a ocupação aumentou o risco de erosão, deslizamento e assoreamento do córrego, devido ao solo arenoso e às grandes declividades, mas, por enquanto, não são relatados casos de inundações (Faustino; Silva, 2016; Lima, 2012).

As demais bacias (Água Fria, Cancã e Feijão) ainda não apresentam problemas com inundações e enchentes, por se tratarem de bacias menos ocupadas e que desaguam em áreas que não sofrem com esses problemas (à jusante da Rotatória do Cristo) (Faustino; Silva, 2016; Lima, 2012). Entretanto, ao considerar a bacia hidrográfica como unidade de planejamento, deve-se lembrar que os impactos em um local podem ser transferidos para localidades à jusante. Além disso, nada impede que o contexto urbano se altere em poucos anos e, sem o planejamento adequado, gere inundações e enchentes como consequência.

A partir de dados do SNIS (2020), elaborou-se a Figura 26, que apresenta a quantidade de enxurradas, alagamentos e inundações em São Carlos entre 2015 e 2020.

Figura 26 - Mapa de quantidade de enxurradas, alagamentos e inundações entre 2015 e 2020.



Fonte: elaborado pela autora, com base nos dados do diagnóstico do SNIS em 2020, 2025.

Segundo as informações disponíveis no SNIS, São Carlos apresentou de zero a cinco eventos de enxurradas, alagamentos ou inundações no período de 2015 a 2020 (Figura 26). Ressalta-se, entretanto, que a informação do SNIS não corresponde à realidade ou à experiência pessoal da autora. Eiras (2017) contabilizou trinta e um eventos entre enchente/inundação e alagamento apenas em 2015. Apesar de se basear em reportagens, o autor registra o local, as coordenadas e a data de cada evento e, portanto, não contabiliza o mesmo evento mais de uma vez. De forma complementar, o estudo de Buarque *et al.* (2020) traz registros históricos de inundações para o período de 2005 a 2018, reforçando a ocorrência recorrente de eventos no município e evidenciando que os registros oficiais não contemplam integralmente os episódios verificados.

Traçado um breve resumo da urbanização em São Carlos, não é uma surpresa que alagamentos, enchentes, inundações e enxurradas sejam alguns dos problemas urbanos mais urgentes. Para serem resolvidos, demandam uma grande quantidade de recursos e de disposição política.

É necessária uma mudança drástica do paradigma de planejamento e de legislação. Um planejamento que considere toda a área da bacia hidrográfica e que preze pelo aumento de áreas permeáveis (para aumentar a infiltração e, como consequência, diminuir o escoamento superficial). Um planejamento que também preze pelo controle da urbanização (especialmente quanto à proteção de áreas de preservação permanente - APPs - e para evitar a ocupação de fundos de vale). Este novo paradigma de planejamento é essencial, mas constitui uma estratégia de médio e longo prazo; por isso, deve ser acompanhado de outras medidas.

3.3. MODELAGEM HIDRÁULICO-HIDROLÓGICA

O *software PCSWMM*, utilizado neste estudo, é uma das ferramentas mais avançadas disponíveis no mercado para a modelagem hidrodinâmica de bacias hidrográficas. Ele é um *software* que permite a criação de modelos hidrológico-hidráulicos semi-distribuídos, nos quais a bacia é dividida em sub-bacias discretas. O programa é baseado na *engine* do *EPA SWMM5*. Seus principais diferenciais com relação ao *EPA SWMM5* são a maior integração com *softwares* GIS e CAD e uma interface intuitiva para o usuário. Através deste *software*, é possível gerar curvas-chave e mapas de inundação, prever vazões e níveis d'água, simular eventos extremos e diferentes cenários, modelar a qualidade da água, entre outras funcionalidades. Tais produtos se configuram como ferramentas essenciais para o gerenciamento de risco de inundações urbanas.

Como elementos de entrada, o *software* requer:

1) Dados de drenagem urbana:

- a) **Macrodrenagem:** seções transversais dos corpos d'água;

- b) **Microdrenagem:** projetos de infraestrutura de drenagem urbana, que incluem bocas de lobo, sarjetas etc.;

2) Dados hidrológicos:

- a) **Pluviométricos:** séries históricas de dados pluviométricos obtidos a partir das estações pluviométricas distribuídas em São Carlos;
- b) **Nível d'água:** dados de nível d'água observados, utilizados na calibração do modelo hidrodinâmico;

3) Características físicas do terreno:

- a) **Modelo digital de elevação (MDE):** informações sobre a topografia da área de estudo;
- b) **Informações sobre o uso e ocupação do solo:** mapas que apresentam a distribuição de áreas permeáveis e impermeáveis do local de estudo.

Para o roteamento hidráulico, selecionou-se o método *Dynamic Wave*, que resolve as equações completas unidimensionais de Saint-Venant - equação da continuidade e da quantidade de movimento nos nós. Esse método pode considerar armazenamento no canal, refluxo, perdas de entrada e saída, reversão de fluxo e escoamento pressurizado. O roteamento por *Dynamic Wave* também é capaz de identificar efeitos de histerese - condição em que curvas-chave podem se tornar inválidas na ocorrência de cheia quando, para um mesmo NA, resultam diferentes vazões (Maldonado, Gamaro, 2013) -, configurando-se como o método que produz os resultados mais precisos do ponto de vista teórico (TBN2NET, 2017).

A curva-chave sintética é construída a partir da relação entre a vazão e o nível d'água, gerados durante a simulação. Ou seja, a curva não é previamente definida no modelo, mas resulta da resposta simulada pelo modelo.

A seleção de dados se baseia nos seguintes critérios: disponibilidade, acessibilidade, precisão, escalas espacial e temporal. A Defesa Civil e a Guarda Municipal de São Carlos, as estações pluviométricas distribuídas pela cidade e,

posteriormente, o levantamento com o uso de *drones* - realizados no âmbito do projeto “Avanços em ferramentas de *nowcasting* aplicadas a inundações urbanas”, financiado pelo CNPq - processo nº 446043/2023-0 - disponibilizaram os elementos investigados no presente estudo. O processo foi dividido nas seguintes etapas:

1) Coleta e seleção de dados: compilação, coleta e análise de dados obtidos. Levantamento com *drone* para a geração do MDE. Dentre os dados coletados, definiu-se quais são úteis e atuais, além de tê-los distribuído espacialmente para determinar quais estão de fato disponíveis;

As etapas posteriores são:

2) Inserção dos dados no modelo: conversão, processamento e integração de dados ao *software PCSWMM*, de forma a serem utilizados como entrada para o modelo hidrodinâmico;

3) Calibração e validação: calibração de parâmetros do modelo, bem como a comparação com os dados de nível d’água observados para a sua validação.

Com o objetivo de reduzir a distância entre a produção acadêmica e a realidade prática, os dados de seções transversais e o arquivo *.inp* do modelo calibrado e validado foram disponibilizados na plataforma Zenodo ([link](#)).

3.3.1. LEVANTAMENTO DE DADOS

3.3.1.1. DADOS NECESSÁRIOS

Conforme explicado anteriormente, os dados necessários estão categorizados em três grandes grupos: dados de drenagem, dados hidrológicos e características físicas do terreno. Além disso, é importante possuir uma curva-chave da área de estudo, para fins de comparação com a curva gerada pelo modelo hidrodinâmico.

3.3.1.2. FONTES DE DADOS E DISPONIBILIDADE

As fontes, já citadas em Materiais e Métodos (3), foram: Defesa Civil, Prefeitura Municipal e Guarda Municipal de São Carlos, estações meteorológicas distribuídas pela cidade, levantamento de *drone* para a geração do MDE e, por fim, estudo desenvolvido por Barbassa (2024), que resultou na curva-chave atualmente existente para um ponto do Monjolinho, da cidade de São Carlos. Convém destacar que a coleta de tais dados foi muito trabalhosa e complexa. Não existe uma organização sistemática, o que prejudicou a sua disponibilidade e acessibilidade. Além disso, essa ausência de organização e sistematização fez com que a etapa de avaliação durasse mais tempo e demandasse mais trabalho do que o esperado. Esse processo será abordado detalhadamente nos tópicos a seguir.

3.3.1.3. AVALIAÇÃO DOS DADOS DISPONÍVEIS

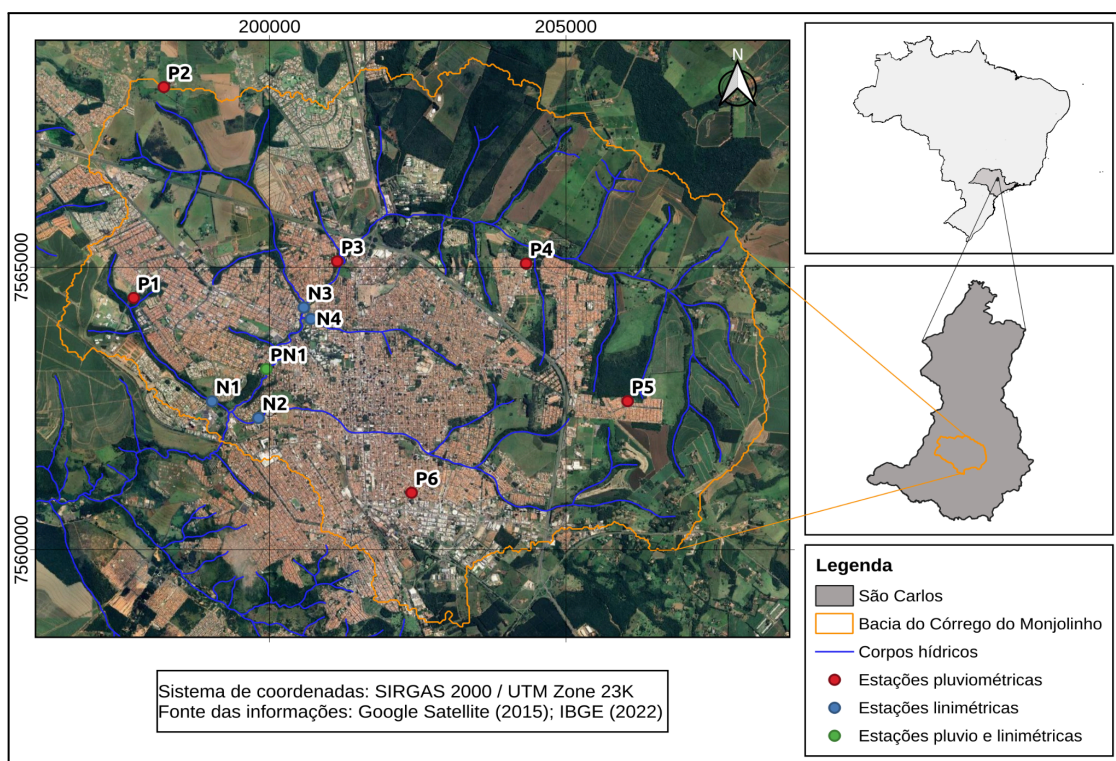
A Prefeitura Municipal disponibilizou um compilado de pastas com arquivos sobre a drenagem urbana em São Carlos. Nota-se, entretanto, a ausência de cadastros com detalhes de microdrenagem, o que resultou no **descarte do uso de informações de microdrenagem** para a geração do modelo hidrodinâmico de São Carlos. Tal decisão encontra respaldo na literatura. Pirone, Padulano, Del Giudice (2026) apontam que a utilização de dados incompletos pode introduzir incertezas relevantes na modelagem, sendo preferível trabalhar com trechos cuja qualidade das informações seja adequada. Além disso, os autores destacam que a ausência de dados em regiões afastadas do exutório não necessariamente compromete de forma significativa as simulações de inundação. Os dados de macrodrenagem eram falhos e dispersos, o que acarretou a necessidade de gerar um arquivo único de *AutoCAD*, contendo a cidade de São Carlos, e espacializar todas as seções disponíveis. Fez-se necessária, também, a ida a campo para conferir quais seções foram realmente construídas e se refletem a situação atual dos corpos d'água em questão.

Quanto aos dados pluviométricos, foram avaliados os dados disponíveis em: (i) estações meteorológicas disponíveis na *internet*; (ii) estações do Centro Nacional

de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), disponibilizadas pela Defesa Civil; e (iii) estações operadas pela Guarda Municipal, que contêm um banco de dados em tempo real. Nenhuma delas, porém, atendia à discretização espaço-temporal e a qualidade demandada pelo projeto.

Neste contexto, no âmbito do projeto “Avanços em ferramentas de *nowcasting* aplicadas a inundações urbanas”, financiado pelo CNPq - processo nº 446043/2023-0, foi instalada uma rede de monitoramento com sete pluviômetros e cinco medidores de nível d’água nos canais da bacia do Monjolinho, dispostos conforme apresentado na Figura 27. Estes dados, que começaram a ser coletados em novembro de 2024, serviram de base para os estudos em questão.

Figura 27 - Mapa de São Carlos, com localização dos pontos da rede de monitoramento.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

A curva-chave adotada foi a elaborada por Barbassa, em 2024, desenvolvida para o ponto PN1 da Figura 27, com dados de ascensão e recessão do hidrograma.

A seção transversal da curva-chave sofreu pouca alteração, como pode ser observado em Barbassa (2024).

Por fim, as características físicas do terreno foram levantadas através de *drone*, devido à falta de um MDE atualizado da cidade, também no âmbito do projeto “Avanços em ferramentas de *nowcasting* aplicadas a inundações urbanas”, financiado pelo CNPq - processo nº 446043/2023-0.

3.3.1.4. COMPLEMENTAÇÃO DOS DADOS E RESULTADOS OBTIDOS

Em etapas posteriores (como o processamento e avaliação de dados e até a própria modelagem), foi necessário complementar ou ajustar os dados obtidos durante a coleta. Para isso, utilizaram-se estudos previamente desenvolvidos, levantamentos em campo e dados disponibilizados por bases estaduais e federais (por exemplo, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA e o Instituto Nacional de Meteorologia - INMET).

Como mencionado anteriormente, foram obtidos dados hidrológicos e de macrodrenagem de São Carlos. Além disso, realizou-se um levantamento por *drone* para a geração do MDE. Todas essas informações estão resumidas na Tabela 01.

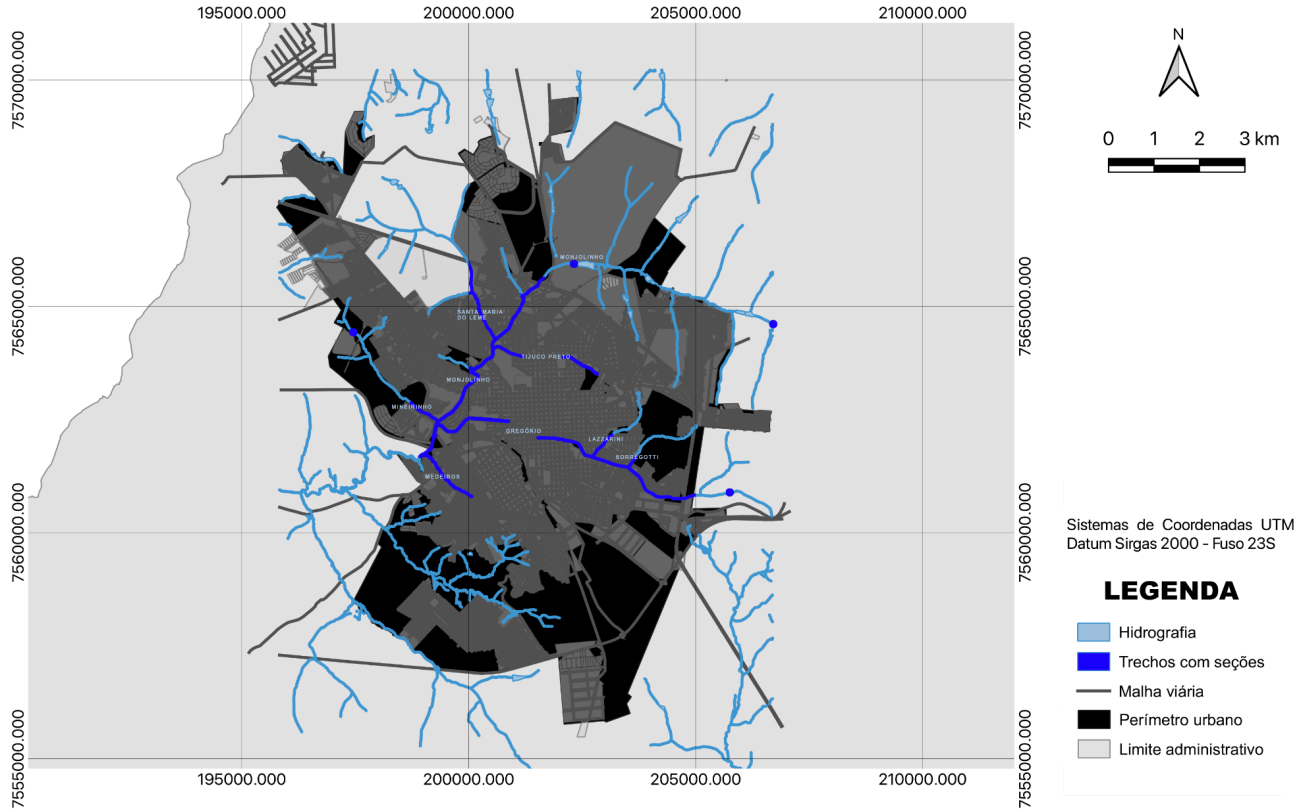
Tabela 01 - Dados coletados.

Coleta de dados para modelagem hidrológica de São Carlos, SP					
Tipo de dado	Dado	Córrego	Quantidade/Observações	Fonte	Comentários
Dados de drenagem urbana	Macro drenagem - seções transversais dos córregos	Monjolinho	88	Prefeitura + Fava, 2013	Difícil acesso e organização. É possível que o número de seções diminua após checagem em campo.
		Santa Maria do Leme	24		
		Tijuco Preto	76		
		Mineirinho	9		
		Lazzarini	12		
		Sorregotti	6		
		Gregório	130		
		Medeiros	18		
Dados hidrológicos	Dados pluviométricos	---	Série histórica	Defesa Civil/Estações Meteorológicas /Rede de monitoramento do projeto CNPq	Difícil acesso. Inadequação da discretização espaçotemporal dos dados existentes.
	Dados de nível d'água	---	A serem definidos, a depender das ocorrências no período com dados de monitoramento	ANA, 2022	
	Mapa de CN	---	Base de dados para o cálculo de CN	Barbassa, 2024	
	Curvas-chave	---	Curva-chave para fins de comparação		
Características físicas	MDE	---	A serem levantados	Drone	Precisou de levantamento por falta de dados atuais disponíveis.

Fonte: elaborada pela autora, 2024.

A Figura 28 destaca os trechos dos corpos d'água que contêm as seções cadastradas. O mapa foi gerado através dos *softwares* QGIS e Photoshop.

Figura 28 - Mapa de São Carlos, com destaque nas áreas que têm seções transversais cadastradas.



Fonte: elaborado pela autora, 2024.

3.3.1.5. SELEÇÃO DE DADOS

Para avaliar os dados coletados, realizaram-se quatro visitas de campo em 2024, nos dias 24/07, 31/07, 07/08 e 04/09. Com o auxílio de trenas tradicionais e a *laser*, avaliaram-se cada uma das seções levantadas na etapa anterior, para verificar se estavam atualizadas e/ou se foram realmente construídas.

Nos casos em que se observou que a seção levantada e a implantada eram muito distintas e a seção atual não era semelhante à anterior ou à posterior, desenhou-se seu esboço e as suas dimensões foram medidas com as ferramentas já mencionadas. Depois de cada viagem, marcou-se, no arquivo *CAD*, quais seções eram válidas e foram desenhadas as novas seções, quando necessário.

Os resultados estão resumidos a seguir:

- 1) **Monjolinho:** 52 seções;
- 2) **Santa Maria do Leme:** 24 seções;
- 3) **Tijuco Preto:** 24 seções;
- 4) **Mineirinho:** 9 seções;
- 5) **Lazzarini:** 9 seções;
- 6) **Sorregotti:** 6 seções;
- 7) **Gregório:** 85 seções.

Isso resultou em duzentas e nove seções, das quais vinte e uma foram desenhadas em campo. Ou seja, as visitas em campo acarretaram na eliminação de 175 (48,2%) das seções transversais coletadas na etapa anterior. Isso é um indicativo de que não há um esforço eficaz, por parte da Prefeitura, em manter o cadastro atualizado da rede de macrodrenagem do município, o que tornou esta etapa da pesquisa mais trabalhosa e complexa.

Após todo esse processo, também se obteve o projeto da ponte no *Campus II* da Universidade de São Paulo e o levantamento topográfico de cinco pontos, onde

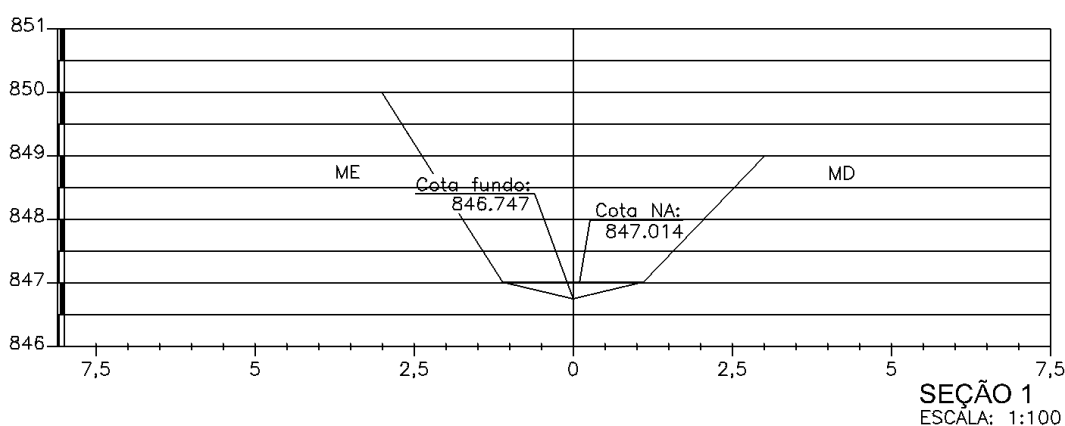
estão instaladas as estações fluviométricas do projeto CNPq (Figura 27). As localizações já continham as seções anteriores, então, decidiu-se que, se as novas informações tivessem sido obtidas **depois** do levantamento, a seção correspondente seria substituída pela nova.

3.3.2. INSERÇÃO DOS DADOS NO MODELO

3.3.2.1. DADOS DE DRENAGEM URBANA

No *PCSWMM*, os dados das seções transversais da rede de drenagem urbana são inseridos na forma de planilha que deve conter duas colunas: os valores das coordenadas x e y. Como apenas os desenhos das seções em *AutoCAD* estavam disponíveis, fez-se necessário realizar essa transformação das coordenadas em tabela para cada uma das 209 seções. Existem diversas formas de realizar essa conversão. A escolhida foi utilizar o *site WebPlotDigitizer*¹. Na Figura 29, está presente um exemplo de seção transversal inserida no *site*. Já a Figura 30 apresenta o resultado da transformação da imagem da seção em coordenadas X e Y, através da ferramenta *View Data*.

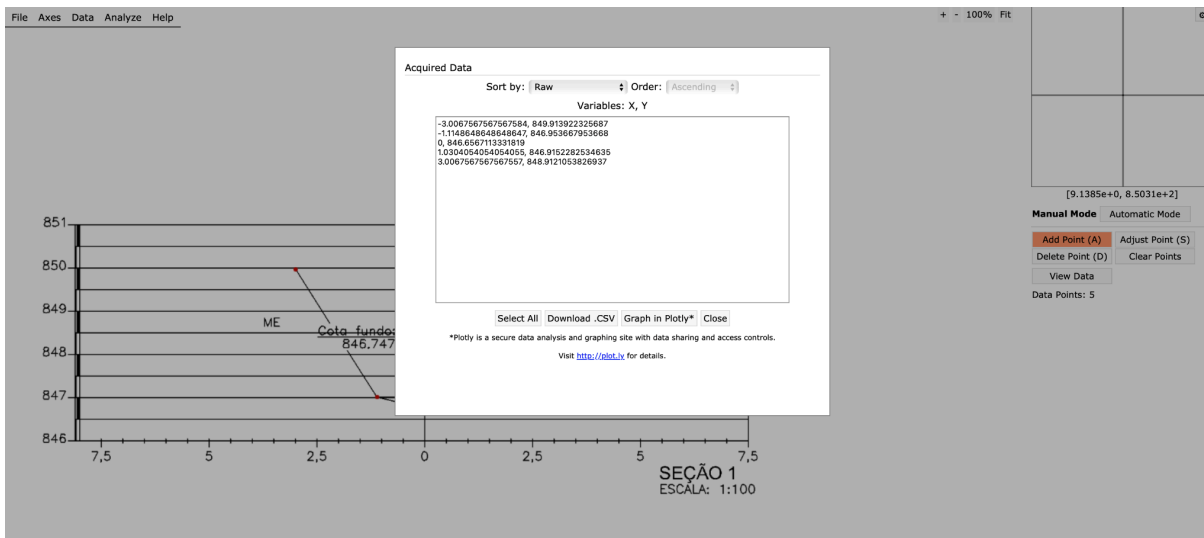
Figura 29 - Exemplo de seção transversal.



Fonte: elaborado pela autora, 2024.

¹ Site disponível em: <https://web.eecs.utk.edu/~dcostine/personal/PowerDeviceLib/DigiTest/index.html>

Figura 30 - Ferramenta View Data.



Fonte: elaborado pela autora, 2024.

Após esse processo, obtiveram-se todas as informações das seções transversais no formato adequado para o *PCSWMM*.

3.3.2.2. DADOS SOBRE AS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA ÁREA DE ESTUDO E PREPARAÇÃO DA BASE

O MDE foi obtido através de um levantamento de *drone*. Inicialmente, a sua resolução era de 0,5 metro. Entretanto, a alta resolução dificultou o processamento do MDE em *softwares*, como o *QGIS*.

Por esse motivo, a resolução espacial foi reamostrada para dez metros, através da função *r.resample* do *QGIS*. Isso porque, ao testar a resolução de cinco metros, o MDE resultante apresentava um erro de mais de cem metros na altitude (ao comparar as altitudes mínimas, máximas e médias dos três MDEs avaliados). Com o MDE de dez metros, entretanto, o erro foi menor do que dois metros, o que justifica essa escolha.

Resoluções muito baixas geram resultados de modelos hidráulicos piores, principalmente em áreas urbanas e/ou de pequena extensão (Abreu Claudino *et al.*,

2022; Benso *et al.*, 2024). Por outro lado, MDEs com maiores resoluções proporcionam resultados melhores, partindo do pressuposto que há poder computacional suficiente para executar esses modelos (Muthusamy *et al.*, 2021). Isto é, o modelo de terreno deve apresentar a resolução ótima para a situação desejada, e não necessariamente a maior resolução.

Ainda no QGIS, importou-se a localização das seções do AutoCAD, que foram marcadas com pontos. Também marcaram-se as junções (pontos que se localizam logo após o encontro entre dois córregos e ao final de trechos de interesse).

A hidrografia oficial (IBGE, 2021), todavia, é muito diferente do que se observa na realidade. Então, com o auxílio de uma imagem de satélite, foi necessário ajustar os pontos e redesenhar a hidrografia simplificada em uma nova camada vetorial.

Ao final do processo, o arquivo QGIS contava com cento e sessenta e dois pontos, que dividem cento e sessenta e um trechos de hidrografia com cento e dezenove seções transversais distintas para representá-los.

Nas tabelas, os pontos são nomeados como J (*junction*) + letras identificadoras dos córregos (G para Gregório, L para Lazzarini, M para Monjolinho, MI para Mineirinho, S para Sorregotti, SI para Simeão, SML para Santa Maria do Leme e TP para Tijuco Preto) + número da sequência (de montante para jusante). Alguns pontos marcados são: JM01, JSML13 e JG33. Quando os pontos representam um encontro entre corpos d'água, a nomeação é um pouco diferente: JTP21M29 é o ponto de encontro entre o Tijuco Preto e o Monjolinho. A numeração do Tijuco Preto é mantida como o último ponto pertencente àquele córrego. A do Monjolinho, o córrego que recebe a contribuição do Tijuco Preto, segue a sequência normalmente.

A nomeação dos trechos é composta por letras identificadoras dos córregos e pela numeração da sequência. Por exemplo, M01, G10, SML13.

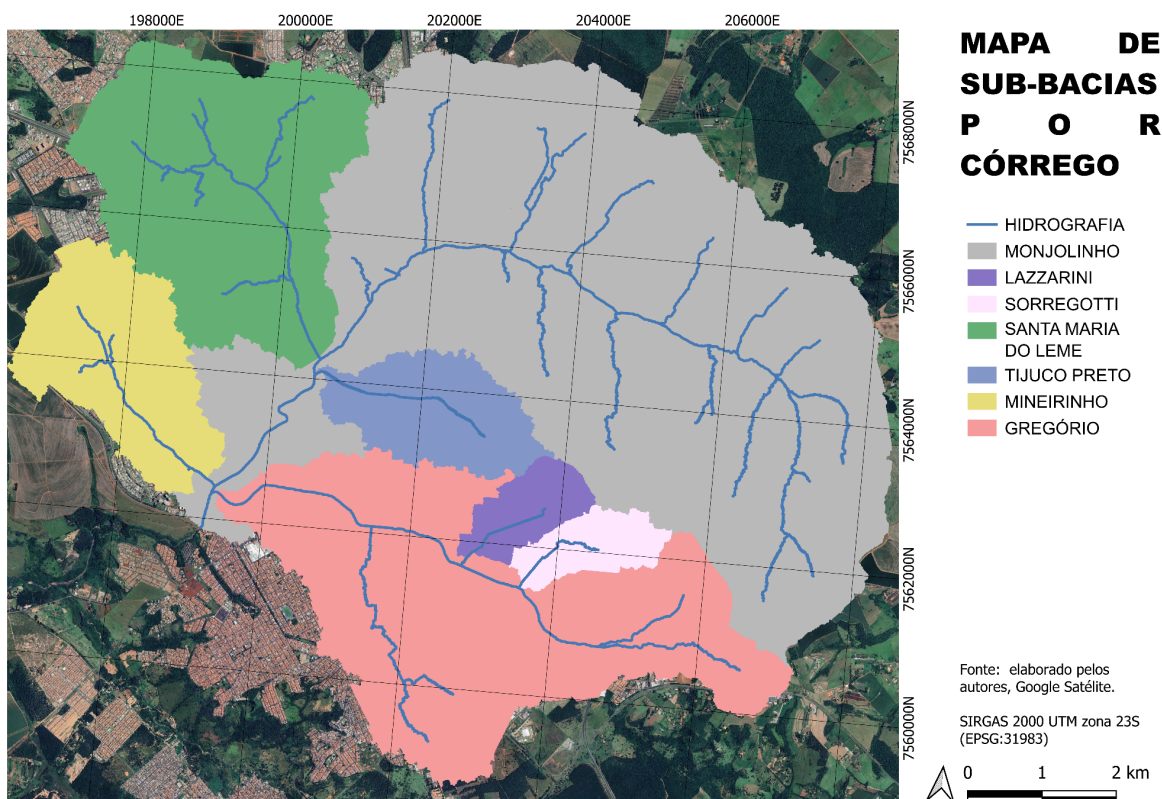
A etapa seguinte foi a marcação dos exutórios para as sub-bacias. A escolha dos pontos seguiu três critérios principais: **(i)** considerar as áreas de montante

não-urbanizadas como uma sub-bacia; (ii) identificar áreas que possuam características de urbanização uniformes através da imagem de satélite; e (iii) não gerar sub-bacias muito pequenas ou muito grandes. Também garantiu-se que haja um exutório de sub-bacia nos locais de monitoramento de níveis d'água dos córregos, que são os pontos de controle da modelagem. O processo resultou em cinquenta e quatro exutórios, cuja nomeação segue a lógica dos nomes de pontos, apenas substituindo o J de *junction* por O de *outlet*. Há, por exemplo, os exutórios: OG09, OTP01 e OM19.

Em seguida, realizou-se a divisão da bacia em sub-bacias, através do *software HEC-HMS*, após a marcação da hidrografia no MDE utilizando o *software RStudio*. Com o *HEC-HMS*, foram geradas cento e vinte e seis sub-bacias, que foram agrupadas em cinquenta sub-bacias no *QGIS*, com o auxílio das ferramentas consertar geometria, e de união e dissolução de camadas vetoriais. Após a verificação manual, constatou-se que a ausência de correção de vegetação prejudicou a geração automática de sub-bacias a partir do MDE. Por tal razão, foram geradas também as sub-bacias a partir do MDT e fez-se a comparação dos dois produtos. Ao final, constatou-se que o MDE ainda gerou sub-bacias mais adequadas, mas foi necessário realizar a correção manual de dezesseis das cinquenta sub-bacias geradas. Os exutórios utilizados também foram exportados do *HEC-HMS*. O mapa com as sub-bacias utilizadas no modelo hidrológico está em Resultados e Discussões. Além disso, gerou-se, na Figura 31, um mapa com as sub-bacias divididas por córrego.

Essa etapa metodológica foi mais complexa e trabalhosa do que o esperado e, por isso, foi escrito um trabalho detalhando os procedimentos, apresentado no XXVI SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (Souza, M. F. *et al.*, 2025).

Figura 31 - Mapa de sub-bacias divididas por córrego.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

A nomeação das sub-bacias seguiu a nomeação de exutórios. Apenas substituiu-se o “O” (de *outlets*) por “SB” (de *sub-basins* ou sub-bacias).

Posteriormente, foram definidas a área, a declividade, a largura e o *CN* (*Curve Number*) de cada uma das sub-bacias. Os três primeiros parâmetros foram calculados com auxílio do *QGIS*. Já para a definição do *CN*, foram utilizados os metadados da ANA, que contêm uma imagem *raster* com os *CNs* em todo o Brasil, com resolução de trinta metros. Como o *CN* é um dos parâmetros de calibração, optou-se por adotar os valores da ANA e fazer o ajuste mais preciso em etapas posteriores.

Utilizando o mapa da ANA como base de dados, foi necessário calcular um *CN* médio ponderado para cada sub-bacia. Para isso, recortou-se o mapa da ANA (*raster*) para cada sub-bacia (camada de máscara). Após a obtenção dos quarenta e

nove recortes, utilizou-se a ferramenta estatísticas da camada de *raster* para cada um deles. Essa ferramenta retorna diversas informações, como os valores mínimo, máximo e a média. Incluiu-se o valor da média (arredondado, pois se trata de um número inteiro) na tabela de atributos da camada BASE, que contém todas as informações.

O *PCSWMM* oferece cinco diferentes opções para o módulo de infiltração: Horton clássico, Horton modificado, Green-Ampt, Green-Ampt modificado e SCS-CN. Dentre elas, adotou-se o método SCS-CN, que é uma versão modificada do método CN. O método original CN não é adequado para simulação contínua, além de ter sido desenvolvido para chuvas de vinte e quatro horas. A versão modificada busca contornar essas limitações. Simplificadamente, essa versão assume que o valor de CN tabulado do solo pode determinar a capacidade total de infiltração daquele solo. Vale destacar que o *PCSWMM* não utiliza o SCS-CN para calcular as abstrações iniciais. Apesar de suas limitações, esse método é utilizado por diversos autores, devido à familiaridade com o método e à disponibilidade de valores tabulados de CN para diversos tipos de solo e de uso de solo (Rossman; Simon, 2022; Fava *et al.*, 2020).

Para a definição da área, utilizou-se a calculadora de campo do QGIS, com a fórmula $\$area$, para criar três colunas na camada BASE: uma de área em quilômetros quadrados, uma em hectares (ha) - unidade utilizada pelo *PCSWMM* - e outra em metros quadrados, para conferir os resultados.

Para a definição da largura da bacia, foi utilizada a ferramenta Caixa Delimitadora Mínima Orientada. Essa ferramenta calcula a área mínima ao redor do retângulo que cobre completamente uma camada de entrada. A partir da caixa gerada, foi possível obter medidas aproximadas da bacia, uma vez que as dimensões da caixa são calculadas a partir das coordenadas espaciais das camadas de entrada (cada uma das quarenta e nove sub-bacias). Considerou-se que a largura seria a maior das duas dimensões dos retângulos resultantes e o valor foi adicionado à camada BASE.

Paralelamente, a largura foi calculada através de um segundo método, desenvolvido por Garcia, Paiva (2004). Nesse método, utiliza-se a largura do

retângulo equivalente como a largura de escoamento para sub-bacias, considerando a representação da bacia hidrográfica retangular. As Equações (1) e (2) descrevem o método.

$$k_c = 0,282 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

Em que k_c é o coeficiente de compacidade, P é o perímetro em metros e A é a área em metros quadrados, para cada sub-bacia.

$$le = \frac{k_c * \sqrt{A}}{1,12} * \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{k_c} \right)^2} \right] \quad (2)$$

Em que le é a largura do retângulo equivalente em metros, k_c é o coeficiente de compacidade e A é a área em metros quadrados, para cada sub-bacia.

O objetivo foi calcular a largura em ambos os métodos para, a partir dos resultados obtidos, escolher o método utilizado para a estimativa inicial de largura das sub-bacias.

Por fim, para facilitar a modelagem no *PCSWMM*, também foi adicionada uma coluna “EXUTORIOS”, com os nomes dos exutórios de cada sub-bacia.

Para preparar a camada de todas as junções, os vértices de todos os trechos foram extraídos (com a ferramenta pontos em extremidades) e apagaram-se os pontos intermediários, deixando apenas os pontos de montante e de jusante de cada trecho. Depois, utilizou-se a ferramenta ajustar geometrias à camada para sobrepor pontos muito próximos e a ferramenta eliminar geometrias duplicadas para eliminar pontos duplicados. Manualmente, alguns ajustes foram realizados e mesclou-se essa camada com a de exutórios, para gerar a camada *JUNCTIONS_PCSWMM*.

Na camada *TRECHOS*, recalculou-se o comprimento dos trechos de hidrografia e duas novas colunas foram acrescentadas: *FROM_NODE* e *TO_NODE*, que representam, respectivamente, os nós de montante e de jusante de cada trecho. Esses nós foram inseridos manualmente, através da tabela de atributos do *QGIS*.

Além disso, a camada de trechos precisou de alguns ajustes: o *PCSWMM* não permite a ligação entre dois nós sem a presença de um conduto (que tinha sido o modelo adotado para representar encontros de córregos). Por isso, foi necessário realizar um ajuste dos trechos e dos pontos (inclusive os exutórios das sub-bacias, que precisaram ser substituídos por junções). Ao final do processo, isso resultou em cento e cinquenta e oito trechos e cento e cinquenta e nove pontos de junção.

Após essa etapa, foi possível iniciar a inserção dos dados no *PCSWMM*.

Ao inserir a base no *PCSWMM*, selecionaram-se as colunas correspondentes da tabela de atributos para os atributos: nome, área (ha), largura (m), *CN* e *outlets*. O *PCSWMM* calculou o atributo de declividade automaticamente. As camadas *JUNCTIONS_PCSWMM* e *TRECHOS* também foram importadas, e foram selecionadas as colunas correspondentes na tabela de atributos para: nó montante e jusante de cada trecho, comprimento (m) do trecho e *IDs* dos trechos e das junções.

Conforme mencionado acima, a declividade foi calculada, em um primeiro momento, no *PCSWMM*, com a ferramenta *SLOPE FROM DEM*, no grupo *Subcatchment*. Entretanto, notaram-se valores inadequados de declividade, o que resultou no retorno para o *QGIS*. Gerou-se o mapa de declividade através da ferramenta de declividade na análise de *raster* e foi extraído o valor médio da bacia com a ferramenta estatísticas da camada de *raster*, semelhante ao processo de calcular o *CN* médio ponderado. Depois, os valores de declividade foram inseridos para cada bacia manualmente no *PCSWMM*. Para essa análise, foi utilizado o *raster* do MDT, e não do MDE, pois o MDE possuía diferenças altimétricas muito grandes, resultantes dos edifícios, o que distorcia erroneamente as declividades.

Alterou-se o modo de infiltração para *CN*, permitiu-se alagamentos com *ALLOW_PONDING YES* (com uma área padrão - *aponded* - de 100 m²). No *QGIS*, com a ferramenta “Amostrar valores do *raster*”, obtiveram-se os valores de elevação de cada *Junction*. Importou-se a nova camada de *Junctions* para o *PCSWMM*. Também foi definido o valor de *report steps* para cinco minutos, que é o intervalo de tempo dos dados de chuva. Definiram-se o percentual de impermeabilização e o atributo *PctZero* (porcentagem de áreas impermeáveis sem armazenamento em depressões). Para o percentual de impermeabilização, utilizou-se o mapa de uso e

ocupação do solo disponibilizado pelo MapBiomass (2024). Deixando apenas as camadas referentes a área não vegetada (em São Carlos, mineração e área urbanizada) visíveis, o uso da ferramenta *r.report* retornou informações de área para cada sub-bacia, em metros quadrados. Essa área foi dividida pela área total da bacia, obtida anteriormente, e utilizada como o percentual de impermeabilização. Para *PctZero*, adotou-se o valor inicial de 50%.

Para a definição de *Nimp*, *Nperv*, *Simp* e *Sperv*, foi consultado o manual do *SWMM* (Rossman, 2015). O manual indica tabelas com uma faixa de valores recomendados para cada um dos parâmetros acima. Foram adotados valores medianos inicialmente (0,015; 0,2; 1,8 mm; e 5,1 mm, em ordem). Esses valores foram adotados inicialmente para a análise de sensibilidade. Posteriormente, poderiam ser alterados.

Foram inseridas todas as seções no *PCSWMM* de duas formas: **(i)** informaram-se as medidas de seções regulares oferecidas pelo *software* (por exemplo, seções circulares e retangulares); ou **(ii)** criou-se uma seção irregular e foram inseridos as coordenadas (ver seção 3.4.1) na tabela disponibilizada.

Algumas seções eram irregulares e fechadas. Entretanto, o *PCSWMM* não permite que seções irregulares sejam fechadas. Então, essas seções foram substituídas pelas seções fechadas disponíveis no *software* de geometria mais próxima. A altura e a largura foram mantidas, e atribuíram-se às demais dimensões valores que fizeram com que a área da nova seção se aproximasse da área da seção original. Isso ocorreu nos trechos: TP05, TP07, M16, M18, M20, M22 e G22.

Dois trechos (T09 e G10) apresentavam seções obstruídas. No T09, cuja seção eram dois quadrados de 1,5 m de lado, apenas metade de um dos quadrados estava desobstruída. Optou-se por representar apenas um quadrado de 1,5 m de lado e, caso necessário, modificar a seção em um momento posterior. Já no G10, há três círculos com 1,5 m de diâmetro. Pelo levantamento da prefeitura, um deles estava completamente obstruído e os outros estavam livres. Em campo, observou-se que todos os três estavam aproximadamente 75% entupidos. Optou-se por seguir as informações da prefeitura e desenhar apenas dois círculos de 1,5 m de

diâmetro. Caso necessário, seria possível alterar essa informação em um momento posterior.

Os trechos L07 e L08 apresentavam dois círculos iguais e um retângulo compondo a seção. Utilizou-se a ferramenta *divider* do *PCSWMM* e esses trechos foram divididos em dois: um com o retângulo (L07.1 e L08.1) e o outro com os dois círculos (L07.2 e L08.2).

Por fim, no trecho G10, dois círculos estavam na mesma altura e o terceiro estava levemente acima. Como a diferença era de por volta de 20 cm, optou-se por ignorá-la.

Para a rugosidade, adotaram-se valores regulares de Porto (2006). Para a primeira iteração do modelo, adotou-se, para todas as seções que estão canalizadas, o coeficiente de rugosidade (n) de 0,018 (concreto). Para os canais naturais, adotou-se 0,035. Foi realizada uma segunda checagem com as fotos de campo, para confirmar os valores.

Todos os parâmetros aqui citados (largura, declividade, n -*imperv*, n -*perv*, s -*imperv*, s -*perv*, rugosidade, *PctZero*, *%Imperv*, *CN* e *aponded*) são passíveis de calibração, e podem vir a ser alterados em etapas posteriores.

Selecionou-se o modo *Elevation* no *PCSWMM*, que faz com que seja necessário inserir as informações de elevação dos condutos em forma de cota, e não de profundidade. Com base na topografia do MDE, nas seções transversais, nas experiências de campo e dos pesquisadores, foram inseridos os valores de *Inlet Elevation* e *Outlet Elevation* de todos os condutos (valores de elevação do nó inicial e final de cada trecho, em metros).

Os resultados das execuções estão em (4.3).

3.3.2.3. AJUSTES PARA MELHORIA NA ESTABILIDADE DO MODELO HIDROLÓGICO

Para a execução inicial do modelo, foi utilizado um arquivo de chuva datado de novembro de 2013. Essa chuva foi utilizada por Fava (2019) para uma modelagem, com menor nível de detalhamento, da bacia do Monjolinho. Assim, foi possível avaliar a qualidade inicial do modelo.

Os erros da primeira execução foram muito acima do esperado; então, antes de iniciar a calibração, foi necessário corrigi-los. O *PCSWMM* aponta os cinco nós com maior erro de continuidade e os cinco condutos com maior erro de instabilidade. A partir disso, cada um desses nós e condutos, bem como suas seções e os trechos anteriores e posteriores, foram avaliados para tentar identificar os possíveis erros.

Essas correções resultaram na eliminação de sete trechos (um no Tijuco Preto e seis no Monjolinho), que apresentaram altos erros de continuidade e/ou instabilidade, devido ao comprimento do trecho em questão ser muito pequeno. Esta eliminação não comprometeu o detalhamento dos condutos no modelo. O trecho anterior ou posterior foi alterado para englobar a área afetada. Além disso, alterou-se o *Routing Time*, que tem o valor padrão de trinta e cinco segundos, para 0,5 segundos. Isso porque o nível de detalhamento alto implica a existência de trechos curtos, que possuem baixo tempo de trânsito. A relação entre o tempo de trânsito dos trechos e o *Routing Time* é essencial para a estabilidade do modelo.

Ao final do processo, o modelo apresenta cento e cinquenta e um trechos e cento e quarenta e oito pontos de controle (dos quais cento e quarenta e cinco são junções, dois são divisores e um é o exutório).

3.3.2.4. ESPACIALIZAÇÃO DAS CHUVAS NAS BACIAS

Para a escolha dos dados hidrológicos, foram analisados os dados coletados pela rede de monitoramento do projeto “Avanços em ferramentas de *nowcasting* aplicadas a inundações urbanas”, financiado pelo CNPq - processo nº 446043/2023-0. A rede começou a funcionar em novembro de 2024.

Em um primeiro momento, definiu-se que os eventos com um volume de vinte ou mais milímetros, dentro de uma hora de chuva, seriam destacados e analisados. A depender do número de eventos, esse limite poderia aumentar ou diminuir.

O primeiro passo foi concatenar todos os arquivos de cada estação em um único arquivo. Isso incluiu os pontos “P”, “N” e “PN” da Figura 27. Para essa concatenação, realizou-se uma limpeza das linhas que não estavam no padrão: estação, ano, dia no calendário juliano, hora e minuto, chuva (no caso dos “P”) ou estação, ano, dia no calendário juliano, hora e minuto, chuva, pressão e desvio padrão da pressão (no caso de “N” e “PN”).

Os dados de chuva, pressão e desvio padrão estavam em formatos como .005 ou -.018 e foram transformados para 0.005 e -0.018. Na pressão, as linhas com valores -6999 foram excluídas, pois esse é o valor padrão de erro. Ainda na pressão, as linhas com valores negativos diferentes de -6999 foram consideradas como 0. Para os valores que se sobrepunham, deu-se preferência aos registros do arquivo mais antigo. Para as estações “N” e “PN”, que medem a pressão da coluna d’água nos canais, a Equação 3 transforma a pressão em nível d’água em metros:

$$NA = Pressão * 2,31 * 0,3048 \quad (3)$$

Em que NA é o nível d’água em metros.

Destaca-se que os dados de “N” apenas foram utilizados para fins de comparação do nível d’água em etapas futuras. As etapas imediatamente seguintes foram realizadas apenas com dados pluviométricos, das estações “P” e “PN”.

Com os dados limpos e concatenados, consideram-se eventos de chuva intensa aqueles episódios com acúmulo de vinte ou mais milímetros de água em uma hora. Em seguida, alterou-se a janela de tempo dos eventos para adequar a janela de tempo como períodos que eram precedidos e sucedidos por, pelo menos, duas horas consecutivas sem precipitação, o que garante a segmentação temporal entre eventos.

Analisou-se cada um dos eventos em cada uma das estações para agrupá-los manualmente. Eventos próximos temporalmente foram considerados

como um único evento. Nesta etapa, considerando-se que o tempo de concentração no ponto mais a jusante da bacia é de aproximadamente 2,1 horas (Romero, 2016), agruparam-se eventos com vinte quatro horas ou menos de proximidade temporal. Os resultados se encontram em (4.4).

Por fim, criou-se um arquivo, para cada evento em cada estação, em que o início começava três dias antes do evento e o fim se encontrava doze horas após o fim do evento. Por exemplo, para o Evento 2, o arquivo se inicia às 14:50 de 25/11/2024 e termina às 04:30 de 29/11/2024. Isto é essencial na modelagem para, no início, “aquecer” o modelo e, no final, permitir a recessão completa do hidrograma. A única ressalva se dá para o Evento 01, porque alguns arquivos se iniciavam após às 15:50 do dia 31/10/2024, devido às datas de instalação das respectivas estações. Neste caso, considerou-se o dado mais antigo disponível. Portanto, o Evento 01 não foi usado para treino, uma vez que os arquivos começam em horários diferentes.

Essas chuvas foram distribuídas nas bacias através do método do inverso da distância ponderada (*Inverse Distance Weighted - IDW*), aplicado mediante uma combinação linear de observações dentro de um raio de pesquisa, considerando-se uma influência decrescente com o aumento da distância (Ruezzene, Miranda, Mauad, 2019). Os autores destacam que esse é um dos métodos mais utilizados para estimar dados faltantes em hidrologia, pois para o uso deste trabalho, a interpolação objetiva estimar a precipitação em locais onde não existem amostragens, ou seja, para cada uma das sub-bacias do modelo.

Fava *et al.* (2021) justificam o uso do *IDW* pela diversidade de aplicações nas quais esse método pode ser utilizado e por proporcionar resultados satisfatórios, apesar de sua implementação simples.

Sheppard (1968) define a Equação 4, do método *IDW*, para o preenchimento de falhas. Entretanto, para este trabalho, a equação foi utilizada com o objetivo de criar uma estação fictícia, localizada no centroide de cada sub-bacia. Isso possibilita a obtenção da chuva representativa ponderada de cada evento por sub-bacia. Portanto, as estações vizinhas, na realidade, seriam os pluviômetros apresentados

na Figura 27. As estações sem dados, por sua vez, são equivalentes às estações fictícias localizadas no centroide de cada sub-bacia.

$$D_x = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{D_i}{d_i^p}\right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^p}\right)} \quad (4)$$

Em que D_x é o dado que falta ser preenchido na estação de interesse; D_i é o dado da estação vizinha de ordem “i” no momento de ocorrência da falha na estação de interesse; d_i é a distância entre a estação de interesse e a estação vizinha de ordem “i”; e p é um número real positivo arbitrário, chamado de parâmetro de potência. Quanto maior “p”, maior a influência d_i no resultado da Equação (4).

Para a espacialização das chuvas, foi desenvolvido um algoritmo em *Python*, no ambiente *Google Colab*, cujo passo-a-passo encontra-se descrito a seguir:

- 1) Os dados de estações P, N e PN encontravam-se agrupados em arquivos “.txt”, com dados mensais. A primeira etapa foi concatenar esses dados em um único arquivo, seguindo duas diretrizes:
 - a) Caso um dado estivesse faltando em um determinado instante ou a linha não estivesse com a configuração padrão do arquivo, essa linha seria apagada;
 - b) Nos casos de sobreposição de dados entre arquivo, mantiveram-se os dados do arquivo mais antigo;
- 2) O processo de definição dos eventos de interesse foi explicitado anteriormente, nesta seção (3.3.2.4);
 - a) O relatório com os eventos de interesse foi utilizado para a divisão de eventos por sub-bacia, ao final do processo;
- 3) Foram adicionados, no *Colab*, os arquivos *BASE_PCSWMM.gpk*, que continha as sub-bacias do modelo bem como uma pasta zipada que continha os *shapefiles* com a localização das estações “P”, “N” e “PN”;

- 4) Realizado o pré-processamento dos passos anteriores, inicia-se a *pipeline*. O arquivo “.zip” é descompactado e o algoritmo lê automaticamente os *shapefiles*, separando as estações em “P” (pluviométricas), “N” (nível) e “PN” (pluviométrica e nível);
- 5) São geradas tabelas com as coordenadas dessas estações;
- 6) O algoritmo lê os arquivos concatenados pelo passo (2) e os une em um único arquivo, que contém os dados concatenados de chuva de todas as estações;
- 7) É realizada uma validação cruzada *Leave-One-Out* do *IDW*, que testa valores de “p” entre 1 e 5, com variação de 0,2 em 0,2. Ou seja, testa $p = 1; 1,2; 1,4; (\dots) 4,8; 5,0$. O algoritmo calcula as métricas *RMSE*, *MAE* e *sMAPE* e escolhe automaticamente o melhor “p” com base no menor *RMSE* (em caso de empate, utiliza o menor *sMAPE*);

- a) Em hidrologia, um valor comum é $p = 2$, então espera-se um valor próximo disso;

A técnica de validação cruzada “retira” um ponto por vez do conjunto de dados e prevê o seu valor usando os demais. Depois disso, é realizada a comparação entre previsão e observação. As Equações 5, 6 e 7 descrevem as métricas utilizadas:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{SIM} - X_{OBS})^2}{n}} \quad (5)$$

Em que *RMSE* é a raiz do erro quadrático médio; X_{SIM} é o valor simulado; X_{OBS} é o valor observado; e n é o número total de observações. Quanto menor o *RMSE*, melhor.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_{SIM} - X_{OBS}|}{n} \quad (6)$$

Em que MAE é o erro médio absoluto; X_{SIM} é o valor simulado; X_{OBS} é o valor observado; e n é o número total de observações. Quanto menor o MAE , melhor.

$$sMAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{|X_{SIM} - X_{OBS}|}{(|X_{SIM}| + |X_{OBS}|)} \right] \quad (7)$$

Em que $sMAPE$ é o erro percentual absoluto médio simétrico; X_{SIM} é o valor simulado; X_{OBS} é o valor observado; e n é o número total de observações. Quanto menor o $sMAPE$, melhor.

Essa validação constatou que o melhor resultado foi $p = 2,2$, valor utilizado nesta pesquisa.

- 8) É realizada uma verificação de consistência entre as estações presentes na tabela de estações pluviométricas e as colunas do arquivo de chuva concatenada de todas as estações, para conferir se as estações estão coerentes nos dois arquivos;
 - a) Destaca-se que a estação PN não foi considerada nas etapas 7 e 8. Isso porque ela apresentou um problema em campo, e não estava registrando dados de chuva (ou seja, apenas registrava dados de nível). Portanto, se ela fosse computada no cálculo, causaria distorções, uma vez que seus dados demonstram que não houve chuva entre novembro de 2024 e maio de 2025. O problema só foi resolvido em setembro de 2025;
- 9) O algoritmo extrai os centróides do arquivo *BASE_PCSWMM.gpk* automaticamente e exporta esses dados para uma nova tabela;
- 10) O algoritmo executa o *IDW*, utilizando o “p” ótimo encontrado e gera uma tabela com as chuvas interpoladas por sub-bacia;
- 11) O algoritmo lê o relatório gerado em (2) e consolida os eventos selecionados em uma nova tabela;

- a) O Evento 01 começou em diferentes instantes (que corresponde aos diferentes instantes em que as estações foram instaladas). Para contornar isso, adotou-se que o início seria o da estação que foi instalada primeiro e o fim corresponde ao da estação que foi instalada por último. O algoritmo utilizado para o cálculo do IDW ignora os dados faltantes para as interpolações;
- b) Opcionalmente, foi adicionado um recorte por cobertura mínima de estações (por exemplo, o evento inicia se houver duas ou mais estações disponíveis);

12) As séries temporais completas são salvas em uma tabela;

13) O arquivo gerado em (12) é recortado para gerar arquivos por evento e por sub-bacia, no formato “.dat”, que é aceito pelo *PCSWMM*. Isso resulta em quatrocentos e quarenta e um arquivos (uma vez que são nove eventos e quarenta e nove sub-bacias);

14) O algoritmo gera um breve relatório explicando as métricas utilizadas em (7);

15) Todos os arquivos gerados entre as etapas (4) e (14) se encontram na pasta resultados. Esta pasta é compactada em resultados.zip e o seu *download* é iniciado automaticamente.

Com isso, o algoritmo abrange a definição de um parâmetro de potência ótimo, bem como todo o processo de espacialização da chuva e a sua divisão nos eventos pré-definidos.

3.3.3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade foi realizada para apoiar a decisão sobre quais parâmetros seriam calibrados. Essa etapa se baseou nas publicações de Yazdi *et al.* (2019) e Mehri *et al.* (2024). Os autores criam três versões do modelo para cada parâmetro: uma versão com o máximo valor, outra com o mínimo valor e a terceira

com o valor-base (explicitados em 3.3.2.2). Cada modelo é executado e se calcula o coeficiente de sensibilidade, dado pela Equação (8):

$$SC = \frac{X}{Y} * \frac{(Y_2 - Y_1)}{(X_2 - X_1)} \quad (8)$$

Em que SC é o coeficiente de sensibilidade; X é o valor-base do parâmetro; Y é a saída prevista para o parâmetro; X_2 e X_1 são, respectivamente, os valores máximo e mínimo do parâmetro; e Y_2 e Y_1 são, respectivamente, os valores correspondentes de saída.

Para a análise de sensibilidade, foram selecionados onze parâmetros. Esses parâmetros, bem como seus modos, valores e limites estão listados na Tabela 02.

Tabela 02 - Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade.

Parâmetros	Modo	Valor base	Valor mínimo	Valor máximo	Limite mínimo	Limite máximo
CN	Variação percentual	Varia por bacia	-20	20	25	98
Largura	Variação percentual	Varia por bacia	-20	20	-	-
Declividade	Variação percentual	Varia por bacia	-20	20	0	100
Percentual de impermeabilização	Variação percentual	Varia por bacia	-20	20	0	100
<i>N-Imperv</i>	Variação percentual	0,015	-20	20	-	-
<i>N-Perv</i>	Variação percentual	0,2	-20	20	-	-
<i>S-Imperv</i>	Valor absoluto	1,8 mm	1,3	2,5	-	-
<i>S-Perv</i>	Valor absoluto	5,1 mm	2,5	7,6	-	-
<i>PctZero</i>	Valor absoluto	50%	0	100	-	-
Área de alagamento	Valor absoluto	100 m ²	0	2500	-	-
Rugosidade	Valor absoluto	0,018 ou 0,035	Varia	Varia	-	-

Fonte: elaborada pela autora, 2025.

O modo percentual ou absoluto indica a forma como o valor foi alterado: caso seja percentual, irá variar +20% ou -20%. Já para valores absolutos, o próprio valor será utilizado. Para o limite do CN, foram adotados os valores mínimo e máximo do manual do SWMM (Rossman, 2015).

Para a perturbação do modelo, foi desenvolvido um algoritmo que, ao inserir o modelo com os valores-base de entrada e um arquivo *txt* com as informações resumidas na Tabela 02, gera vinte e dois novos modelos, dois (máximo e mínimo) para cada parâmetro.

Adotando a vazão de pico no exutório de toda a bacia em estudo (JM44) como a saída (Y), calculou-se o coeficiente de sensibilidade para cada parâmetro. Os parâmetros com maiores coeficientes, ou seja, os parâmetros mais sensíveis, foram escolhidos para serem calibrados e validados. A escolha da vazão de pico se justifica por ela ser o parâmetro mais relevante para o gerenciamento de risco de inundações urbanas.

3.3.4. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

3.3.4.1. ETAPA PRÉ-CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

Para avaliar essa etapa, foi utilizado o índice de eficiência Nash-Sutcliffe (*NSE*), amplamente empregado em hidrologia e apresentado na Equação 9 (Nash; Sutcliffe, 1970).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (H_i - H_i^*)^2}{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H}_i)^2} \quad (9)$$

Em que *NSE* é o índice de eficiência Nash-Sutcliffe; H_i é o nível d'água observado no intervalo de tempo "i"; H_i^* é o nível d'água simulado no intervalo de tempo "i"; \bar{H}_i é a média dos valores observados; e *n* é o número total de observações de nível d'água.

O índice de Nash-Sutcliffe varia entre $-\infty$ e 1, sendo que:

- 1) $NSE = 1$ representa o modelo perfeito;
- 2) $0 < NSE < 1$ indica que a previsão do modelo é melhor do que a da média dos valores observados;
- 3) $NSE = 0$ indica que a previsão do modelo é tão boa quanto a da média dos valores observados;
- 4) $NSE < 0$ indica que a previsão do modelo é pior do que a da média dos valores observados.

Para a etapa de pré-calibração, foi criado um arquivo *Excel* que compilava todos os dados de nível d'água simulados e observados de todos os nós e todos os eventos, obtidos em etapas anteriores. A partir desses dados, foi calculado o parâmetro NSE por nós e por evento. Isso objetivou oferecer uma visão inicial da qualidade do modelo com relação aos dados observados, bem como facilitar na identificação de possíveis erros na rede de monitoramento.

Para a categorização do NSE , adotou-se a classificação utilizada pelo Manual Técnico de Referência do *HEC-HMS* (2015), que define:

- 1) Quando $0,75 < NSE \leq 1,00$, é considerado muito bom;
- 2) Quando $0,65 < NSE \leq 0,75$, é considerado bom;
- 3) Quando $0,50 < NSE \leq 0,65$, é considerado satisfatório;
- 4) Quando $NSE \leq 0,50$, é considerado insatisfatório.

3.3.4.2. ETAPA DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

Para a calibração, foi utilizado o calibrador automático desenvolvido por Fava (2019). Esse calibrador escolhe uma dentre quatro funções: Nash-Sutcliffe, Eficiência Média de Nash-Sutcliffe, Eficiência Espacial de Nash-Sutcliffe e Eficiência Regional de Nash-Sutcliffe. Para mais detalhes, consultar Fava (2019).

Na análise de sensibilidade do calibrador de Fava (2019), são avaliados os seguintes parâmetros: declividade; *CN*; largura da bacia; *PctZero* (porcentagem de área impermeável sem armazenamento em depressão); *Nimp* (coeficiente de Manning para áreas impermeáveis); *Nperv* (coeficiente de Manning para áreas permeáveis); *Simp* (profundidade do armazenamento em depressão de áreas impermeáveis); *Sperv* (profundidade do armazenamento em depressão de áreas permeáveis); rugosidade (coeficiente de rugosidade de Manning para canais e condutos); e *%Imperv* (porcentagem de área impermeável).

A definição dos parâmetros a serem avaliados foi determinada pela análise de sensibilidade (3.3.3) e os seus valores foram definidos em (3.3.2.2).

O calibrador permite a divisão dos parâmetros em grupos. Por exemplo, o *CN* se divide em três grupos: o grupo 1 se refere a áreas de montante, que são menos urbanizadas. Por tal razão, admite-se que os valores testados variem entre trinta e nove e oitenta e cinco. O grupo 2 se refere a áreas de urbanização alta e consolidada, e varia o *CN* entre setenta e noventa e cinco. Já no grupo 3, a urbanização é alta, mas não tanto quanto o grupo 2. Portanto, o *CN* varia entre sessenta e noventa. Essa mesma lógica se repete para os demais parâmetros, podendo existir uma variação do número de grupos.

Para os parâmetros largura e declividade, a variação é percentual: para a largura, adotou-se $\pm 30\%$. Já para a declividade, escolheu-se $\pm 20\%$.

Três das quatro funções-objetivo foram testadas: Nash-Sutcliffe (que busca maximizar o *NSE*), Eficiência Média de Nash-Sutcliffe (que busca maximizar o *NSE* médio de múltiplas estações) e Eficiência Espacial de Nash-Sutcliffe (que aplica o conceito de *NSE* a médias espaciais, e busca maximizar esse *NSE*).

O calibrador de Fava (2019) possui as configurações de calibração listadas a seguir:

- 1) Probabilidade de cruzamento de dois pontos;
- 2) Probabilidade de mutação de *flip bit*;
- 3) Seleção de indivíduos;

- 4) Variáveis de decisão;
- 5) Tamanho da população;
- 6) Número de gerações;
- 7) Funções-objetivo;
- 8) Critério de parada.

Antes de iniciar a etapa de calibração automática, foi necessário preparar um arquivo de chuva contínua para os eventos de calibração e validação, conforme descrito a seguir:

- 1) O calibrador entende apenas um único arquivo de chuvas validadas e calibradas, ao invés de um por precipitação. Portanto, para criar este arquivo, foi necessário:
 - a) Calcular a quantidade de chuva (em mm) e a intensidade (mm/h);
 - b) Classificar cada evento em relação à sua intensidade, de acordo com a *American Meteorological Society (AMS)* e o Escritório de Meteorologia do Reino Unido (*UK Met Office*), apresentados na Tabela 03.

Tabela 03 - Classificação dos eventos de chuva segundo *AMS* e *UK Met Office*.

<i>AMS</i>		<i>UK Met Office</i>	
Intensidade (mm/h)	Classificação	Intensidade (mm/h)	Classificação
Até 2,5	Chuva leve	Menos de 0,5	Chuva leve
2,5 - 7,6	Chuva moderada	0,5 - 4	Chuva moderada
Acima de 7,6	Chuva pesada	Acima de 4	Chuva pesada

Fonte: *AMS* (2012); *Met Office* (2007).

- c) Sortear os eventos de calibração e de validação;

- i) O Evento 01, devido à discrepância entre datas de instalação dos pontos da rede de monitoramento, foi definido como de validação;
 - ii) Definiu-se que seriam seis eventos de calibração e três eventos de validação;
 - iii) Nos eventos de validação, deve existir pelo menos um evento de chuva pesada;
 - iv) O sorteio foi realizado através da função **sort** no *Python*;
- d) Definição de datas simuladas para a criação do arquivo concatenado simulado:
- i) O evento simulado deve ter a mesma data de início do primeiro arquivo de evento real daquele tipo (calibração ou validação);
 - ii) Ao final do primeiro evento, consideram-se três dias de *dry time* (tempo seco);
 - iii) A data de início simulado do segundo evento deve ser ao final desse tempo seco;
 - iv) E assim sucessivamente, até acabarem os eventos daquele tipo;
 - v) Isso foi realizado depois do processo de espacialização de chuvas na bacia através do *IDW*, o que resultou em quarenta e nove arquivos de chuva para calibração e quarenta e nove arquivos de chuva para validação, a serem inseridos no modelo do *PCSWMM*;
 - vi) O mesmo foi realizado para os dados observados de nível d'água. Isso resultou em dois arquivos por estação de monitoramento válida: um de calibração e um de validação;
 - vii) No caso dos dados observados de nível d'água, alguns ajustes foram necessários:

- (1) Levou-se em consideração o *offset* (deslocamento) do sensor em relação ao fundo do canal. Assim:
- (a) Na hipótese de o dado observado ter sido zero milímetro, considera-se como **sem informações**. Isso porque pode ser qualquer valor entre o *offset* do sensor e o nível do fundo do canal;
 - (b) Caso o dado observado tenha sido superior a zero milímetro, foi somado o *offset* daquela estação ao valor;
 - (c) Isso causou algumas alterações nos valores calculados de *NSE*, mas o modelo ainda tem um bom desempenho na identificação de momentos em que há pico do hidrograma;
- e) Criação de um modelo de calibração e, posteriormente, de validação que contivesse todos os arquivos de chuva de cada sub-bacia presentes na mesma pasta do arquivo do modelo;
- f) Criação de um único arquivo *Excel*, com quatro abas (JMI05, que corresponde a N1; JG47, que corresponde a N2; JSML18, que corresponde a N3; e JM32, que corresponde a PN1), com as colunas: Data, Hora, Nível medido (em metros), para que o calibrador seja capaz de calcular as métricas necessárias;
- g) Divisão dos parâmetros em grupos:
- i) Para o *CN*, foram criados três grupos:
 - (1) Grupo 1: bacias mais permeáveis. Engloba as bacias com *CN* calculado inicialmente menor do que setenta. Foram testados os valores entre trinta e nove e oitenta e cinco;
 - (2) Grupo 2: bacias mais impermeáveis. Engloba as bacias com *CN* calculado inicialmente maior do que oitenta.

Foram testados os valores entre setenta e noventa e cinco;

(3) Grupo 3: bacias impermeáveis. Engloba as bacias com CN calculado inicialmente entre setenta e oitenta. Foram testados os valores entre sessenta e noventa;

ii) Para *N-perv* e *N-Imperv*, manteve-se a mesma divisão do CN, com os seguintes valores:

(1) Grupo 1: *N-perv* entre 0,01 e 0,9; *N-imperv* entre 0,01 e 0,2;

(2) Grupo 2: *N-perv* entre 0,01 e 0,3; *N-imperv* entre 0,01 e 0,03;

(3) Grupo 3: *N-perv* entre 0,01 e 0,5; *N-imperv* entre 0,01 e 0,1;

iii) A rugosidade do calibrador está relacionada com a seção transversal e é aplicada apenas em seções irregulares. Portanto, foram verificadas todas as seções irregulares e conferiu-se se estavam em canais com rugosidade para concreto (0,018) ou canal natural (0,035). Assim, restaram dois grupos:

(1) Grupo 1: canais naturais. Foram testados os valores entre 0,01 e 0,2;

(2) Grupo 2: canais artificiais. Foram testados os valores entre 0,01 e 0,09;

iv) Para percentual impermeável da bacia, adotaram-se quatro grupos:

(1) Grupo 1: bacias que, no modelo, apresentaram o valor entre zero e vinte nesse parâmetro. Foram testados os valores entre zero e trinta;

- (2) Grupo 2: bacias que, no modelo, apresentaram o valor entre vinte e quarenta nesse parâmetro. Foram testados os valores entre dez e cinquenta;
 - (3) Grupo 3: bacias que, no modelo, apresentaram o valor entre quarenta e sessenta nesse parâmetro. Foram testados os valores entre trinta e setenta;
 - (4) Grupo 4: bacias que, no modelo, apresentaram o valor maior que sessenta nesse parâmetro. Foram testados os valores entre cinquenta e cem;
- v) Para a declividade e a largura da bacia, as variações são percentuais, para mais ou para menos:
- (1) Para a declividade, há uma variação possível de 20%;
 - (2) Para a largura, a variação percentual possível é de 30%;
- h) Optou-se por testar as três das quatro funções objetivas disponibilizadas. Portanto, criaram-se cópias da pasta do calibrador e o parâmetro *objective_function* foi alterado, de forma que existisse fo1, fo2 e fo3. Os resultados de experimentos em fo4 retornaram inadequados e, por isso, essa função foi descartada.

Após essas alterações, foi possível rodar o calibrador automático. Para isso, optou-se por rodar o calibrador localmente (foi necessário instalar o *Python 3*, e as bibliotecas: ***swmm5, deap, pandas, openpyxl*** e ***xlrd***).

O calibrador automático desenvolvido por Fava (2019) busca automaticamente os melhores valores dos parâmetros selecionados do modelo *SWMM* disponibilizado (nesse caso, declividade, largura, *N-perv*, *N-imperv*, *CN*, *%Impervious* e rugosidade) através de um Algoritmo Genético (*GA*). O algoritmo foi desenvolvido em *Python 3.6* e utiliza as bibliotecas *Distributed Evolutionary Algorithms in Python (DEAP)* e *SWMM5*. Esse algoritmo executa várias versões do modelo (arquivo *.inp*) com o *SWMM* e compara os níveis d'água simulados com os dados observados, armazenando o melhor resultado. O critério de parada é baseado

no desvio entre a função de avaliação do melhor conjunto de parâmetros da geração atual (i) e da geração anterior ($i - 1$). O processo de otimização deve ser interrompido quando esse desvio é menor do que 0,00001 por três gerações consecutivas.

Para isso, o calibrador:

- 1) Lê os arquivos de entrada (*saocarlos.ini*, que contém parâmetros, grupos, faixas, objetivos e limites; o *modelo.inp* e os arquivos com dados de chuva, necessários para a sua execução; e *dados-calib.xlsx*, que contém as séries observadas, com data, hora e nível medido em metros);
- 2) Realiza o pré-processamento desses dados:
 - a) Transforma as descrições do arquivo *.ini* em parâmetros para calibrar e gera uma representação interna dos parâmetros;
- 3) Inicializa a população, ao criar N indivíduos (nesse caso, cem ou trezentos indivíduos). Cada indivíduo é um conjunto completo de valores de parâmetro dentro dos limites definidos, ou seja, cada indivíduo representa uma versão modificada do modelo;
- 4) Avalia cada indivíduo:
 - a) O calibrador altera o modelo de acordo com os parâmetros do indivíduo e executa o *SWMM* para essa versão modificada. Após a execução, o calibrador extrai os resultados simulados e calcula a função-objetivo, comparando os dados simulados e observados;
- 5) Seleciona e evolui:
 - a) Com base no *NSE*, o GA seleciona indivíduos para reprodução, aplica *crossover* (mistura) e mutação para criar a geração seguinte e aplica penalidades se houver violações (parâmetros fora dos limites estabelecidos no arquivo *.ini*);
- 6) Itera por gerações:

- a) Repete os passos (4) e (5) por G gerações. Monitora e salva o melhor indivíduo por geração;
- 7) Salva os arquivos *partial.inp*, como um *checkpoint* durante a execução, *final.inp*, que é o modelo calibrado, e arquivos CSV com o histórico de modificações.

Portanto, ao final dessa etapa, obtém-se o modelo calibrado. Após a calibração, esse modelo será utilizado para a etapa de validação: substituem-se os arquivos de chuva (inserindo-se os arquivos de chuva de validação) e o resultado é comparado com os valores de nível d'água de validação observados para a análise dos resultados obtidos.

Antes de calibrar, entretanto, foi realizado mais um ajuste empírico. Percebeu-se que o nível dos eventos sempre retornava para zero, o que não corresponde com a realidade, uma vez que os córregos não são intermitentes.

Então, avaliando o levantamento topográfico para o ponto N1, nota-se que o nível d'água da margem em que foi instalado o sensor é de aproximadamente quinze centímetros (uma diferença de dez centímetros em relação ao ponto em que o sensor foi instalado). Portanto, admite-se, por simplificação, que, para períodos secos, o nível d'água esperado resulte em um valor próximo de quinze centímetros.

Para isso, acrescentou-se vazão de *inflow* nos nós que recebiam a contribuição de uma sub-bacia, ou seja, os seus exutórios. Nessas quarenta e nove junções, foi adicionada uma vazão de tempo seco (*dry weather*). Para a definição desse valor, foram testados diferentes valores de vazão no ponto N1. O valor que fez com que o nível d'água em tempo seco fosse de aproximadamente quinze centímetros foi $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

A escolha de N1 foi por motivos práticos: dentre os córregos que apresentavam pontos de controle, o Mineirinho tem o menor número de sub-bacias, o que facilitou experimentar diferentes valores para a vazão em N1.

Encontrado o valor da vazão que resultava no nível d'água esperado em N1, calculou-se a vazão específica, dividindo a vazão ($1 \text{ m}^3/\text{s}$) pela área de contribuição

do ponto. Para encontrar as vazões dos demais nós, multiplicou-se a vazão específica pela área de contribuição da bacia em que aquele nó é um exutório.

A partir dessas vazões, realizou-se um ajuste manual em cada ponto de controle, até conseguir diminuir a distância entre os valores observados e os simulados no hidrograma. Este processo foi realizado por tentativa e erro, multiplicando-se a vazão obtida no passo anterior por diversos valores até encontrar o resultado adequado.

Depois desse processo, **N3** (referente ao ponto JSML18) **ainda apresentava uma diferença notável**. Isso se justifica porque, ao verificar o local em campo, há um acúmulo de lixo no pilar próximo do sensor (Figura 32). Ou seja, a água é forçada a passar por cima dos resíduos, o que aumenta o NA registrado pela rede de monitoramento. Não havia outro local viável para a instalação do sensor. Optou-se por não forçar a equivalência entre os valores simulados e observados, pois isso estaria superdimensionando o modelo. Ajustes específicos para esse ponto foram realizados em etapas posteriores.

Figura 32 - Acúmulo de lixo no ponto N3 (02/12/2025).



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Já no dia 06/02/2026, a seção transversal nesse mesmo ponto se encontrava completamente diferente (provavelmente após uma limpeza com retroescavadeira), como explicitado pela Figura 33. Isso ilustra o quão variadas são as condições da

seção do ponto N3, algo que se reflete nos dados de nível d'água obtidos pela rede de monitoramento e que não é possível prever, com precisão, no modelo.

Figura 33 - Seção transversal do ponto N3 em 06/02/2026.



Fonte: elaborado pela autora, 2026.

Com o novo modelo, que contém vazões de tempo seco, foi possível iniciar a calibração.

A primeira tentativa de calibração se deu com o evento concatenado, que, ao final do processo, consistia em um arquivo de quarenta e seis dias de duração. Entretanto, cada rodada do modelo demorava cerca de um minuto e meio para ser executada. Com a população de trezentos indivíduos e o número de gerações igual a cem, o modelo demoraria aproximadamente trinta e um dias para rodar. Isso inviabilizou o uso do evento completo para a população e o número de gerações inicialmente adotadas (trezentos indivíduos e cem gerações).

Na segunda tentativa, com o modelo configurado para apenas um evento representativo (Evento 04), mantiveram-se os valores de população e geração. Entretanto, percebeu-se que a convergência da função-objetivo 03 acontecia por volta da quadragésima geração. Assim, realizou-se uma terceira tentativa, com o número de gerações igual a quarenta e a população de trezentos indivíduos. Essa última versão demorou pouco menos de dois dias para ser executada. Foram executados em paralelo testes para as funções objetivo 01, 02 e 03, conforme mencionado anteriormente.

Com esse número de gerações, a função objetivo 03 para um evento atingiu a convergência, mas as funções 01 e 02 não. Assim, na quarta tentativa de calibração, optou-se por executar três situações em paralelo:

- 1)** Diminuir o número de gerações (fo3 com quarenta gerações, pois, em testes executados, foi a função que convergiu mais rapidamente; fo1 e fo2 com sessenta gerações) e manter a população inicial (trezentos indivíduos). Quanto aos dados de chuva, utilizou-se o evento concatenado de calibração;
 - a)** O número de quarenta gerações para fo3 foi definido a partir de experimentações com o modelo para um evento. Percebeu-se que fo1 e fo2 não conseguiram encontrar a convergência dentro desse valor, então optou-se por aumentar o número de gerações para verificar se, com esse aumento, a convergência seria alcançada;
- 2)** Manter o número de gerações da opção (1) e diminuir a população (cem indivíduos). Quanto aos dados de chuva, utilizou-se o evento concatenado de calibração:
 - a)** Para tentar viabilizar o uso do evento concatenado na calibração, optou-se por diminuir a população.
- 3)** Diminuir o número de gerações para fo3 (cinquenta gerações, pois foi o modelo que convergiu mais rapidamente), manter o número de gerações inicial para fo1 e fo2 (cem gerações) e manter a população inicial (300 indivíduos). Quanto aos dados de chuva, foi selecionado um evento

considerado representativo entre os eventos de calibração (Evento 04) e o calibrador foi executado para um modelo com esse evento;

- a) Essa opção foi considerada caso a calibração do evento concatenado não fosse viável;
- b) Se a calibração de um evento concatenado não fosse viável, o modelo calibrado para apenas um evento seria o utilizado no restante do desenvolvimento da pesquisa. Logo, os demais eventos (01, 02, 03, 05, 06, 07, 08 e 09) seriam utilizados para a validação.

A partir dos resultados obtidos na quarta tentativa, foi possível avaliar qual função-objetivo apresentou os melhores resultados, além de definir se o desenvolvimento da pesquisa prosseguiria com a calibração realizada com o evento concatenado ou se essa abordagem se mostraria inviável.

3.3.4.3. ETAPA PÓS-CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

Finalizada a execução do calibrador automático de Fava (2019), analisou-se o modelo e calculou-se o *NSE*, para verificar a qualidade da calibração. Caso os resultados sejam insatisfatórios (por exemplo, na ausência de aumento significativo do *NSE* nos diferentes pontos de controle - N1, N2, N3 e PN1 - em comparação ao modelo não calibrado), previa-se a calibração manual do modelo.

Essa calibração também se baseia na análise de sensibilidade, ou seja, calibra apenas os parâmetros mais sensíveis do modelo. Além disso, em um primeiro momento, procurou-se respeitar os limites dos grupos de cada parâmetro, definidos em (3.3.4.2). Apenas quando necessário para o adequado ajuste do modelo, admitiu-se a extrapolação desses intervalos, contanto que ainda respeitassem os limites físicos dos parâmetros (por exemplo, não é possível uma porcentagem de impermeabilização maior do que 100%).

Esta etapa de calibração consiste na modificação, de forma manual, dos parâmetros dentro do modelo no *PCSWMM*. Foram testadas, para cada parâmetro, as seguintes possibilidades:

- 1) Valores extremos do intervalo do grupo;
- 2) Valores aleatórios, próximos do extremo que apresentou os melhores resultados;
- 3) Extremos dos grupos seguintes;
- 4) Limites físicos do parâmetro.

Em geral, as mudanças foram avaliadas pela aproximação do pico de nível d'água do valor simulado ao pico do valor observado. Quanto mais o hidrograma simulado é próximo do hidrograma observado, melhor é o modelo. Caso os valores originais performassem melhor, eles seriam mantidos.

Observa-se que:

- 1) Apesar de se tentar ajustar os valores para todos os picos, notou-se que, em geral, os picos iniciais dos eventos não apresentaram grandes modificações, independentemente dos valores adotados na calibração manual;
 - a) Seria necessária uma investigação mais profunda sobre a razão desse fenômeno, mas supõe-se que pode estar relacionado à saturação e umidade inicial do solo, que não foram consideradas no modelo desenvolvido por este trabalho;
- 2) De forma geral, independentemente da variação nos parâmetros, o tempo de pico não sofreu grandes alterações. Entretanto, o tempo de recessão do modelo apresentou mudanças visíveis a depender do valor dos parâmetros (em especial, da rugosidade do canal).

Nesta etapa, quando necessário, foram realizados ajustes nas cotas dos pontos do modelo, com o objetivo de minimizar e/ou eliminar problemas de instabilidade numérica.

Por fim, cada ponto de controle foi analisado individualmente, para verificar a necessidade de ajustes específicos e manuais. Notou-se que, novamente, o cálculo de *NSE* para o N3 apresentou resultados inadequados, o que tornou necessária a adoção de estratégia específica para a avaliação da calibração do modelo para este ponto.

O acúmulo de lixo próximo ao sensor (Figura 32) superdimensiona os valores de NA observados. Isso porque, para atravessar N3, a água precisa passar por cima dos resíduos acumulados, o que aumenta artificialmente os valores medidos pelo sensor. Assim, os NAs de base do Santa Maria do Leme (N3) nos dados observados são muito altos, e não correspondem à realidade.

Percebeu-se que, para alcançar os valores de nível d'água base observados (sem considerar o acúmulo de lixo no pilar), seria necessária uma vazão de *inflow* de 10 m³/s, o que é inviável para um córrego com as características do Santa Maria do Leme. Porém, o NA base do modelo, para vazões de *inflow* coerentes (obtidas a partir do método da vazão específica - explicado em 3.3.4.2), era 0,08 metro.

Para tentar contornar esse problema, adotou-se como NA de base o valor simulado (0,08 m). Todos os NAs abaixo de 0,3 metro foram modificados para 0,08 metro e mantiveram-se os valores superiores a esse limite. O valor de trinta centímetros como limiar inferior foi uma escolha prática:

- 1) Na realidade, cada evento apresenta um valor de acúmulo de lixo distinto e que não pode ser medido ou inferido após a ocorrência do evento. Dentro desse mesmo evento, podem existir diferentes alturas, pois o lixo pode se acumular ou ser arrastado pela correnteza ao longo do tempo;
- 2) Entretanto, se fosse definido um valor maior (como quarenta ou cinquenta centímetros), informações reais seriam perdidas nesse processo, a depender dos eventos. Além disso, foram testados outros valores (por exemplo, cinquenta centímetros) e os resultados mais adequados foram para trinta centímetros. O valor também foi embasado por observações do local;
- 3) Foi realizado um teste desconsiderando os dados observados abaixo de 0,3 metro, mas os resultados foram piores. Assim, optou-se por realizar a

substituição dos valores entre o nível do sensor e 0,3 metro para 0,08 metro e calcular o NSE considerando esses NAs.

Mesmo após esse ajuste, os valores de *NSE* em N3 ainda não foram altos. Entretanto, o modelo está representando relativamente bem os picos e os tempos de pico, que são os principais objetivos deste estudo.

3.4. OBTENÇÃO DA CURVA-CHAVE SINTÉTICA

Após a calibração e a validação do modelo, foi gerada, no *PCSWMM*, a curva-chave de interesse, referente ao ponto PN1 (Figura 27). A escolha desse ponto se deve à existência da curva-chave elaborada por Barbassa (2024), que será adotada como a curva empírica para efeitos de comparação.

Para a obtenção da curva-chave sintética, foi gerado um algoritmo em *Python*, no *Google Colab*, que possui as seguintes etapas:

- 1) Inserção de dois arquivos:
 - a) *JM32.dat*: arquivo que possui o NA simulado de PN1 no *PCSWMM* para um único evento que concatena todos os nove eventos selecionados, com um intervalo de três dias entre eles;
 - b) *JM32_Tl.dat*: arquivo que possui os valores simulados de vazão (*total inflow*) para o ponto de controle PN1, também gerado para os nove eventos concatenados em um único arquivo, como explicado em (a);
- 2) Leitura e tratamento dos arquivos de entrada, que resulta em dois *dataframes* com duas colunas: *DateTime* e *Value*;
- 3) Sincronização das informações de nível e de vazão;
 - a) Ou seja, para cada instante de tempo, há um ponto de nível associado à sua vazão;
- 4) Ajuste da curva-chave sintética, no modelo da Equação (10), para seguir o formato da equação da curva-chave de Barbassa (2024):

$$Q_{SINTÉTICA} = a * h^3 + b * h^2 + c * h + d \quad (10)$$

Em que $Q_{SINTÉTICA}$ é a vazão simulada pelo modelo em m³/s; a , b , c e d são os coeficientes da equação que precisam ser ajustados; e h é o NA em metros.

Ainda nessa etapa, o algoritmo calcula as métricas R^2 e $RMSE$ do ajuste, que medem quão bem a curva sintética representa os dados do próprio modelo. O cálculo de R^2 está explicitado pela equação (11). Já o $RMSE$ foi explicitado na Equação (5).

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (Q_i^{obs} - \overline{Q^{obs}}) * (Q_i^{modelo} - \overline{Q^{modelo}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_i^{obs} - \overline{Q^{obs}})^2 * \sum_{i=1}^N (Q_i^{modelo} - \overline{Q^{modelo}})^2}} \right)^2 \quad (11)$$

Em que R^2 é a métrica que mede o grau de correlação linear entre os valores de referência e os valores simulados; Q_i^{obs} é a vazão de referência no instante “i”; Q_i^{modelo} é a vazão simulada no instante “i”; $\overline{Q^{obs}}$ é a média das vazões de referência; e $\overline{Q^{modelo}}$ é a média das vazões simuladas.

A curva considerada como observada, obtida com dados medidos em campo, foi a elaborada por Barbassa (2024), e está expressa na Equação (12):

$$Q_{OBS} = -0,4269 * h^3 + 15,868 * h^2 - 0,9544 * h - 0,2718 \quad (12)$$

Em que Q_{OBS} é a vazão considerada como observada em m³/s e h é o NA em metros.

- 5) Geração de um hidrograma que, a partir de dados de nível d’água arbitrários, resulta nos dados de vazão para a curva sintética e para a curva de Barbassa (2024), objetivando a avaliação visual do ajuste e identificação de possíveis desvios;

- 6) Construção de um hidrograma comparativo da vazão simulada e da vazão observada com base nos níveis d'água observados da estação PN1. Ou seja, para um mesmo nível, são gerados dois hidrogramas, cada um utilizando uma curva-chave diferente. Isso permite observar a diferença de picos, as defasagens e os comportamentos de recessão.

3.5. COMPARAÇÃO COM A CURVA-CHAVE EMPÍRICA

A comparação entre a curva-chave sintética do ponto PN1 - obtida em (3.4) - e a curva-chave empírica, obtida por Barbassa (2024), para esse mesmo ponto permitiu a análise de qualidade e de erros da modelagem. Esta análise se dá através da comparação das vazões geradas para cada NA pelas duas curvas.

A vazão calculada pela curva-chave sintética foi comparada à da curva-chave empírica para diferentes níveis d'água. A comparação visual é baseada no hidrograma comparativo gerado em (3.4).

Além disso, são analisadas as seguintes métricas:

- 1) *RMSE* (Equação (5));
- 2) *NSE* (Equação (9));
- 3) R^2 (Equação (11));
- 4) *P-Bias*, explicitado na Equação (13):

$$PBIAS = 100 * \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i^{modelo} - Q_i^{obs})}{\sum_{i=1}^N Q_i^{obs}} \quad (13)$$

Em que *PBIAS* é a tendência média do modelo em superestimar ou subestimar valores de referência; Q_i^{obs} é a vazão de referência no instante "i"; e Q_i^{modelo} é a vazão simulada no instante "i".

Com essas métricas, é possível validar a curva-chave sintética e determinar a sua aplicabilidade para a previsão de enchentes urbanas.

3.6. ANÁLISE DE APLICABILIDADE DE CURVAS-CHAVE SINTÉTICAS PARA A PREVISÃO DE INUNDAÇÕES URBANAS

Esta etapa consiste na análise e discussão dos resultados das etapas anteriores. Caso exista proximidade entre as curvas-chave empírica e sintética, algo definido pela análise de erros descrita em (3.5), a curva sintética pode ser aplicada para os mesmos fins da curva-chave empírica, possibilitando a sua obtenção para todos os exutórios das sub-bacias do modelo desenvolvido. Caso contrário, conclui-se pela inadequação da substituição da curva-chave empírica pela sintética para a área de estudo e as condições analisadas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. LEVANTAMENTO DE DADOS

O processo de coleta de dados foi bem sucedido. Resultou em: **(i)** trezentas e quarenta e cinco seções transversais de sete córregos que pertencem à bacia hidrográfica do Monjolinho; **(ii)** dados hidrológicos (série histórica e curva-chave desenvolvida por Barbassa, 2024); e **(iii)** características físicas da área de estudo. O número de seções diminuiu drasticamente depois de se fazer uma checagem em campo para definir a situação atual dos córregos, sendo utilizadas apenas cento e dezenove seções distintas para o modelo.

Os dados levantados serviram como entrada para o modelo hidrodinâmico. Quanto mais dados de qualidade alimentarem o modelo, mais preciso ele será. Por isso, o processo de coleta e validação de dados é uma etapa crucial para a modelagem.

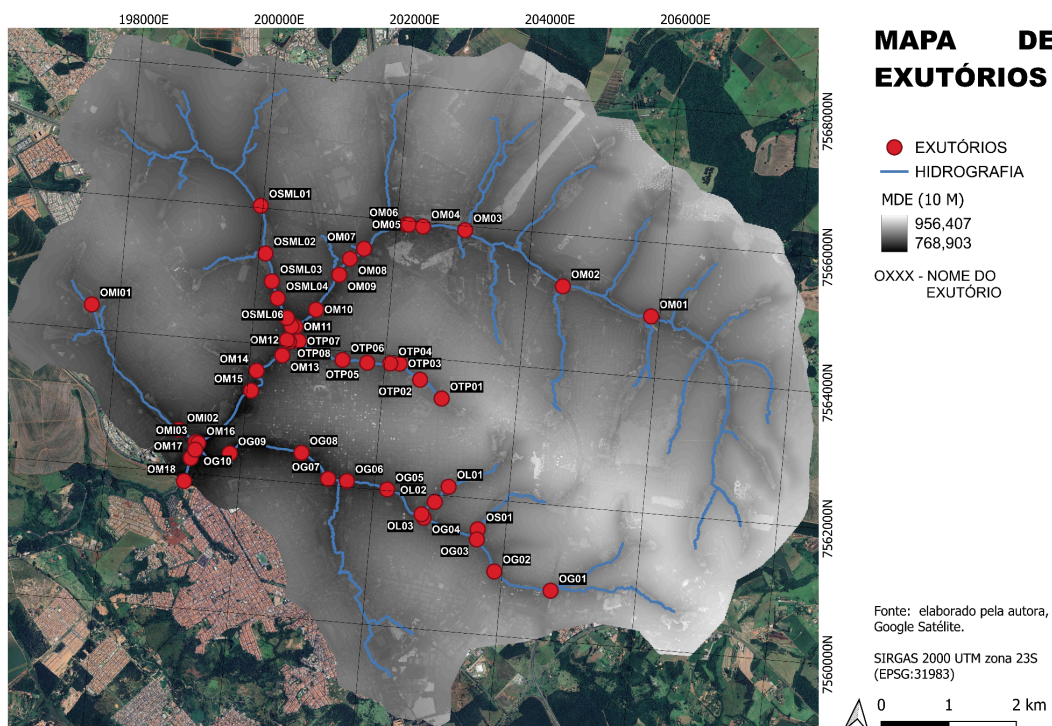
Centralizar o monitoramento e o armazenamento é imprescindível para incentivar e facilitar a modelagem hidrodinâmica, cujo objetivo é a melhoria do

gerenciamento de risco de inundações urbanas em todo o país. Esse gerenciamento é essencial, visto que a emergência climática e o alto grau de impermeabilização das cidades brasileiras tornam essas inundações mais frequentes e intensas.

4.2. PREPARAÇÃO DA BASE DO MODELO

Inicialmente, foram marcados cinquenta e quatro exutórios. Ao final de todo o processo de verificação e correção, porém, o modelo no QGIS apresentou quarenta e nove exutórios e, conseqüentemente, quarenta e nove sub-bacias corrigidas e verificadas. Isso porque, após análise mais detalhada, decidiu-se juntar as bacias geradas por OSML02 e OSML03, mantendo apenas o exutório OSML02, além de apagar quatro outros exutórios que não geraram sub-bacias válidas (originalmente, os exutórios OM15, OTP01, OTP07 e OSI01). A Figura 34 apresenta a localização de cada um dos quarenta e nove exutórios resultantes.

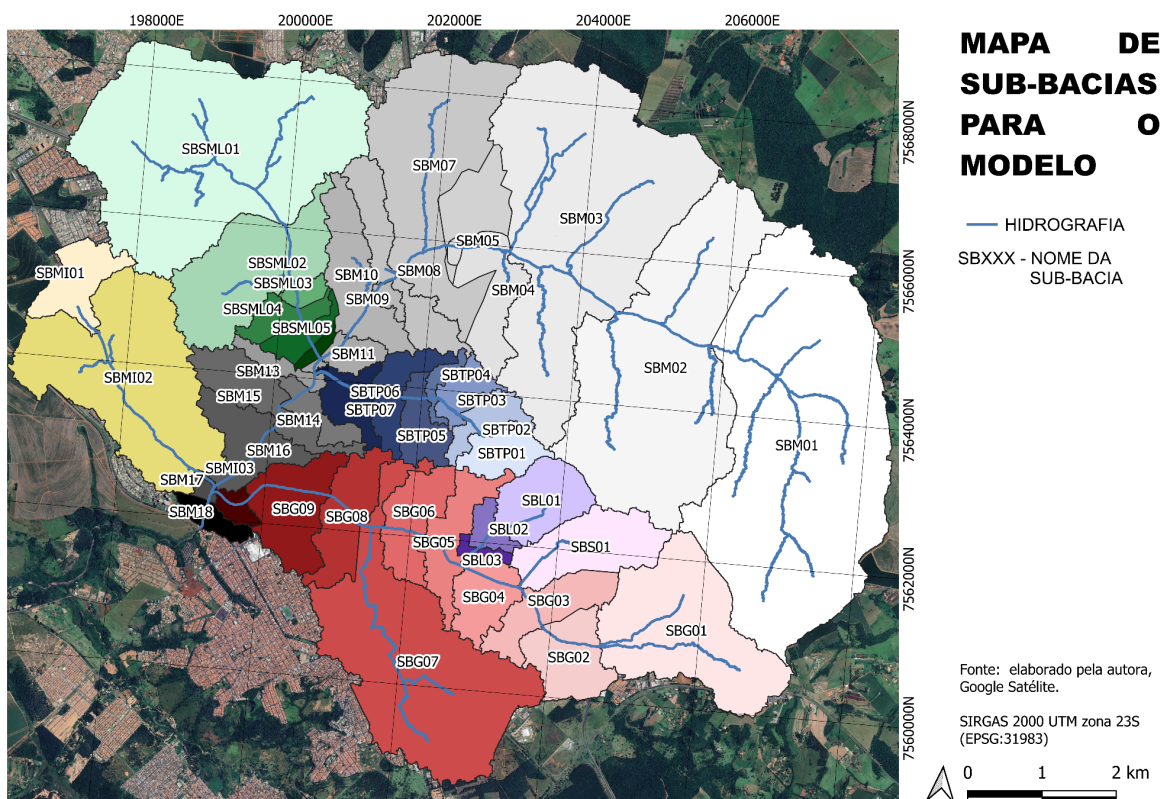
Figura 34 - Mapa de exutórios.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

A Figura 35 ilustra as quarenta e nove sub-bacias resultantes e renomeadas adequadamente.

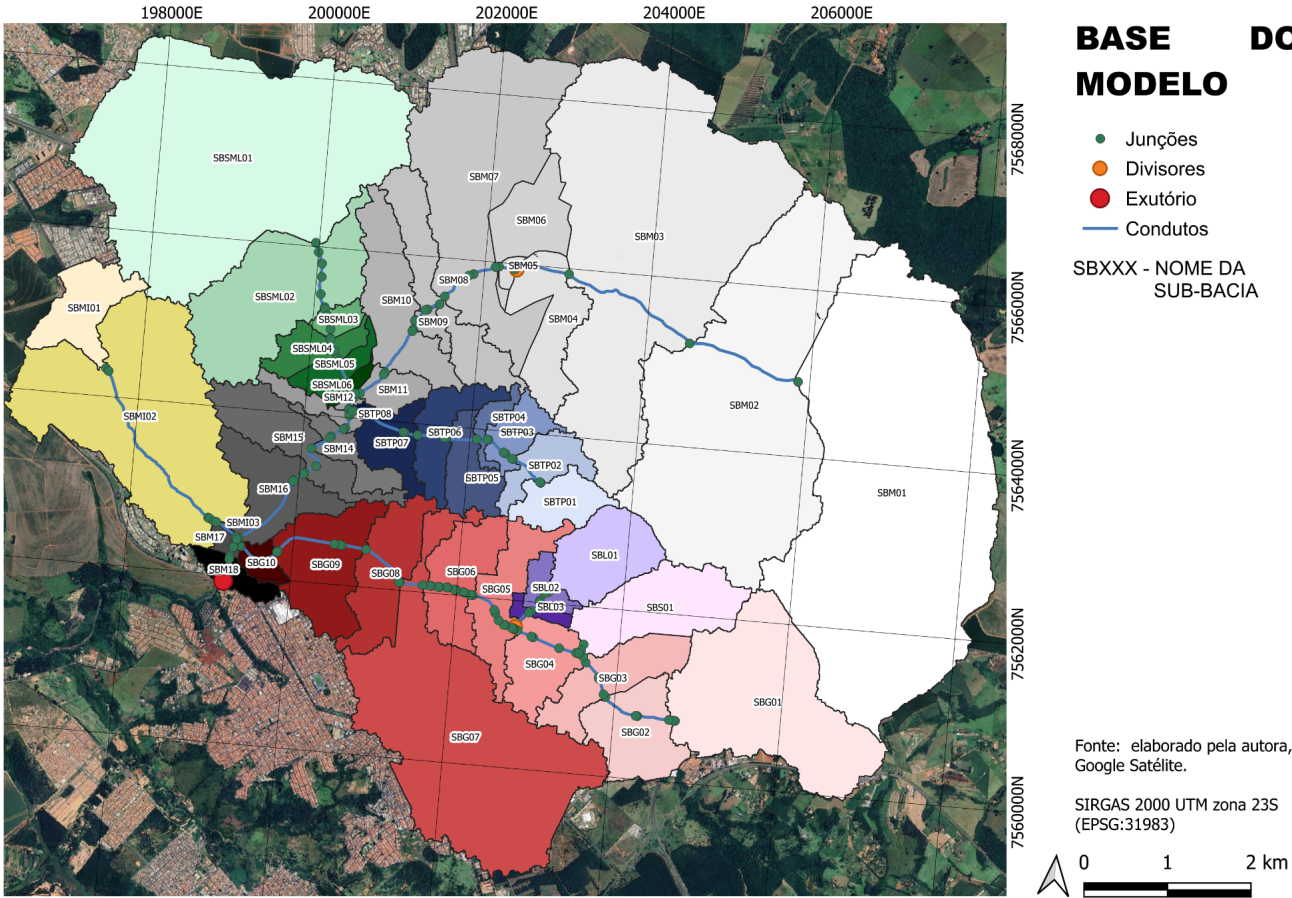
Figura 35 - Mapa de sub-bacias para o modelo hidrológico.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Apenas parte da hidrografia da Figura 35 foi representada na modelagem com vistas à propagação das vazões no modelo hidráulico. Nesse sentido, foram representados os trechos em que existiam dados de seções transversais. Na Figura 36, é possível observar quais trechos de hidrografia foram efetivamente inseridos no *PCSWMM*. Para as áreas de montante desses trechos, foram consideradas as características das sub-bacias para a inserção no modelo chuva-vazão.

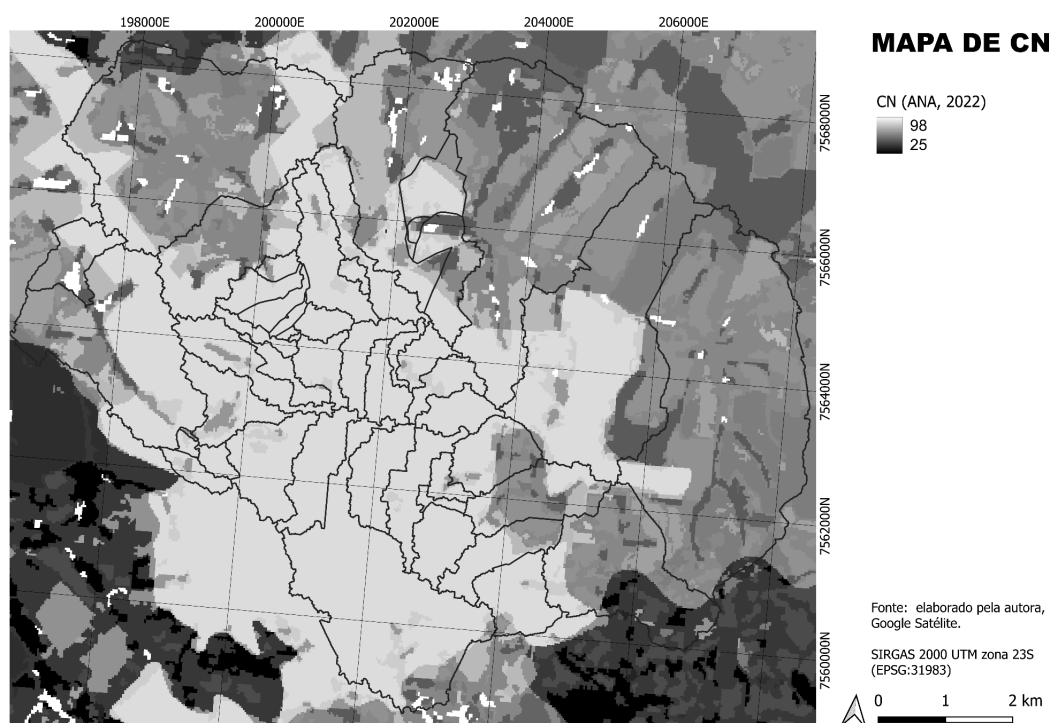
Figura 36 - Mapa base do modelo hidrológico.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

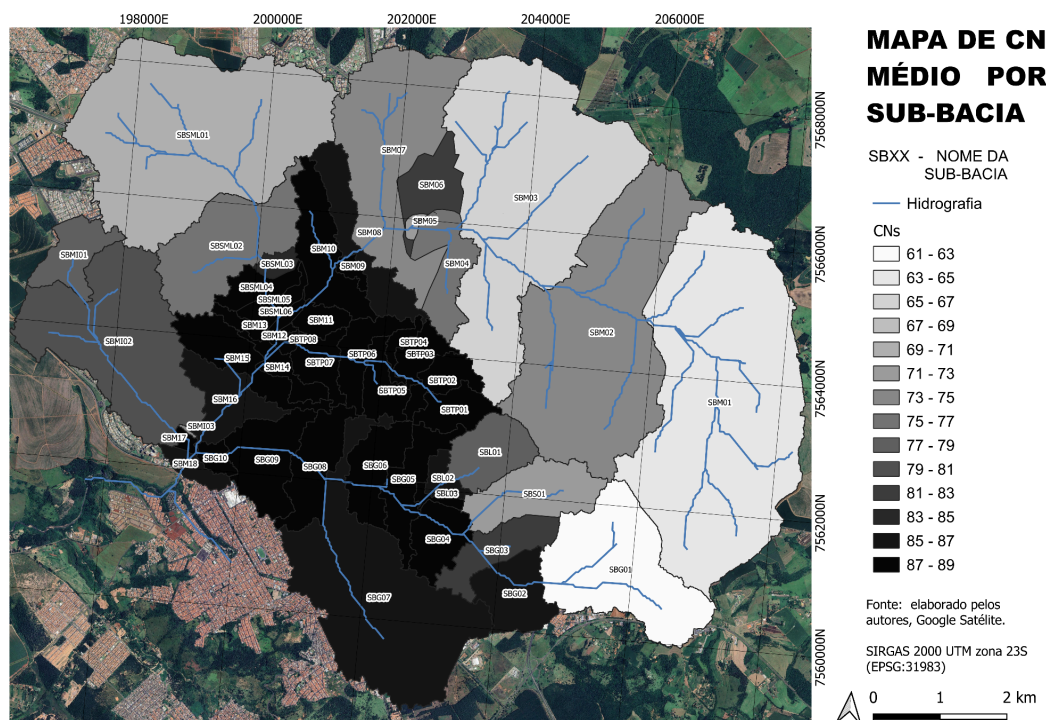
A Tabela 04 resume a área, *CN* médio ponderado, largura e largura equivalente para cada sub-bacia. Além disso, a Figura 37 apresenta o mapa de *CNs*. A Figura 38 demonstra como resultou o mapa de *CNs* médios de todas as sub-bacias, obtidos, como mencionado em (3.3.2.2), através do recorte de sub-bacias e da ferramenta “Estatísticas da camada de *raster*”.

Figura 37 - Mapa de *CNs* para a área de estudo.



Fonte: elaborado pela autora, com informações da ANA (2022), 2025.

Figura 38 - Mapa de CNs médios ponderados por sub-bacia.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Tabela 04 - Área, CN e largura de cada sub-bacia.

Sub-bacia	Área (ha)	CN médio	Largura (m)	Largura equivalente (m)
SBG01	346,3	61	2711,99	615,72
SBG02	106,11	87	1220,06	381,61
SBG03	94,74	82	2149,13	264,58
SBG04	79,61	89	1226,74	297,81
SBG05	91,57	89	2353,42	198,35
SBG06	96,06	89	1700,27	304,7
SBG07	551,5	87	4428,22	524,42
SBG08	107,35	89	2121,78	283,34
SBG09	130,73	88	1770,82	360,85
SBG10	20,84	89	689,44	153,61
SBL01	105,09	78	1474,25	395,64
SBL02	26,69	87	730	143,28
SBL03	12,19	89	759,68	83,78
SBMI01	84,75	79	1383,88	249,6
SBMI02	463,48	80	3154,72	591,91
SBMI03	1,56	75	324,45	36,17
SBM01	1069,16	65	5903,75	1126,29

Sub-bacia	Área (ha)	CN médio	Largura (m)	Largura equivalente (m)
SBM02	748,38	75	4853,96	813,97
SBM03	842,64	67	4820,01	819,13
SBM04	104	76	1968,42	289,98
SBM05	7,35	72	473,2	167,19
SBM06	83,8	83	1712,57	360,05
SBM07	401,73	74	3873,67	539,61
SBM08	112,46	87	3106,73	189,16
SBM09	13,99	88	583,3	115,04
SBM10	131,09	88	2724,17	273,17
SBM11	32,23	89	872,4	218,52
SBM12	3,7	89	377,13	112,02
SBM13	25,38	89	1403,1	132,41
SBM14	40,44	89	1710	200,63
SBM15	105,12	88	2782,88	269,03
SBM16	101,5	86	1536,12	108,88
SBM17	8,87	88	436,44	168,74
SBM18	29,65	87	1261,14	945,81
SBSML01	816,45	71	4087,69	408,6
SBSML02	245,44	77	2964,08	176,59
SBSML03	18,71	84	690,07	201,5
SBSML04	44,97	88	1434,9	194,25
SBSML05	33,23	89	1264,67	122,12
SBSML06	10,65	89	875,5	401,45
SBS01	143,05	73	2259,98	233,44
SBTP01	57,86	89	1340,02	181,27
SBTP02	51,44	88	1320,19	188,92
SBTP03	43,72	88	976,27	86,06
SBTP04	18,05	89	1107,75	232,59
SBTP05	57,67	89	1304,23	209,68
SBTP06	64,53	89	1672,58	218,15
SBTP07	56,78	89	1207,63	44,54
SBTP08	1,53	89	193,26	68,81

Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Nota-se que a diferença das larguras obtidas pelos dois métodos é consideravelmente alta. Adotou-se o método de Garcia, Paiva (2004) para a primeira estimativa da largura antes da calibração e validação desse parâmetro, porque, ao dividir a área da bacia pela largura equivalente, os valores de comprimento resultaram mais coerentes. Os resultados do método da Caixa Delimitadora Mínima Orientada estão expressos na coluna “Largura (m)”. Já os resultados do método de Garcia, Paiva (2004) se encontram na coluna “Largura equivalente (m)”.

4.3. RESULTADOS INICIAIS DA MODELAGEM

Na primeira execução, os seguintes erros e avisos retornaram:

- 1) **Warning 03 (negative offset ignored for link XXX)**: esse erro indica que a informação de *Inlet/Outlet Elevation* dos condutos está em uma elevação menor do que a informação de elevação do próprio nó. O *PCSWMM* ignora, então, a informação e adota os dados do nó. Portanto, foi necessário corrigir as informações de altitude dos nós para eliminar o erro;
- 2) **Warning 04 (minimum elevation drop used for conduit XXX)**: o *PCSWMM* adota o valor mínimo automaticamente, para que a declividade do conduto não seja nula;
- 3) **Warning 08 (elevation drop exceeds length for conduit XXX)**: o *PCSWMM* utiliza o comprimento real do conduto, e não a distância horizontal. Mas o *software* corrige esse erro automaticamente, recalculando o comprimento do trecho em questão;
- 4) **Error 136 (divider XXX has invalid diverted link)**: foram inseridas as informações corretas do *diverted link* (que é o conduto de montante). Além disso, alteraram-se os condutos L07.1 e L07.2 de forma a serem equivalentes ao que eram os condutos L07.1, L07.2, L08.1 e L08.2 antes da alteração. O comprimento foi recalculado automaticamente.

Nos avisos e nas mensagens de erro, “XXX” representa a nomeação de qualquer divisor, *link* ou conduto que apresentou o problema indicado pelo *software*.

Com o acerto da elevação das *junctions* e da informação de *diverted link*, todos os avisos e erros foram resolvidos. Só assim foi possível rodar, com sucesso, o modelo pela primeira vez em 23 de junho de 2025.

4.4. RESULTADOS DA ANÁLISE DOS DADOS DE CHUVA

Ao final do processo de identificação e escolha de eventos de interesse, foram selecionados nove eventos, que podem ser observados na Tabela 05.

Tabela 05 - Eventos de interesse.

Dia de início	Início	Dia de fim	Fim
03/11/2024	15:50	03/11/2024	17:25
28/11/2024	14:50	28/11/2024	16:30
13/12/2024	17:55	13/12/2024	19:25
20/12/2024	13:55	21/12/2024	21:25
29/12/2024	15:55	03/01/2025	14:10
22/01/2025	20:55	22/01/2025	22:45
31/01/2025	01:35	01/02/2025	01:45
18/02/2025	14:45	20/02/0205	18:50
24/04/2025	19:05	25/04/2025	16:50

Fonte: elaborada pela autora, 2025.

Após a espacialização das chuvas, resultaram quatrocentos e quarenta e um arquivos de chuva, uma vez que existem nove eventos de interesse e quarenta e nove sub-bacias. Esses arquivos se iniciam três dias antes e finalizam doze horas depois de o evento terminar. Conforme mencionado em (3.3.2.2), a discretização temporal dentro dos arquivos de chuva é igual a cinco minutos.

4.5. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade foi realizada com o objetivo de subsidiar a seleção ou exclusão de parâmetros na etapa de calibração.

Para simplificar, optou-se por considerar que os parâmetros base (X) são a média ponderada dos valores presentes no modelo. Por exemplo, para parâmetros como *CN* e *%imperv*, que são relacionados a sub-bacias, a média é ponderada pela área de cada sub-bacia. Já para a rugosidade, o peso é o comprimento dos condutos. A Tabela 06 resume os resultados obtidos. *SC* é o coeficiente de

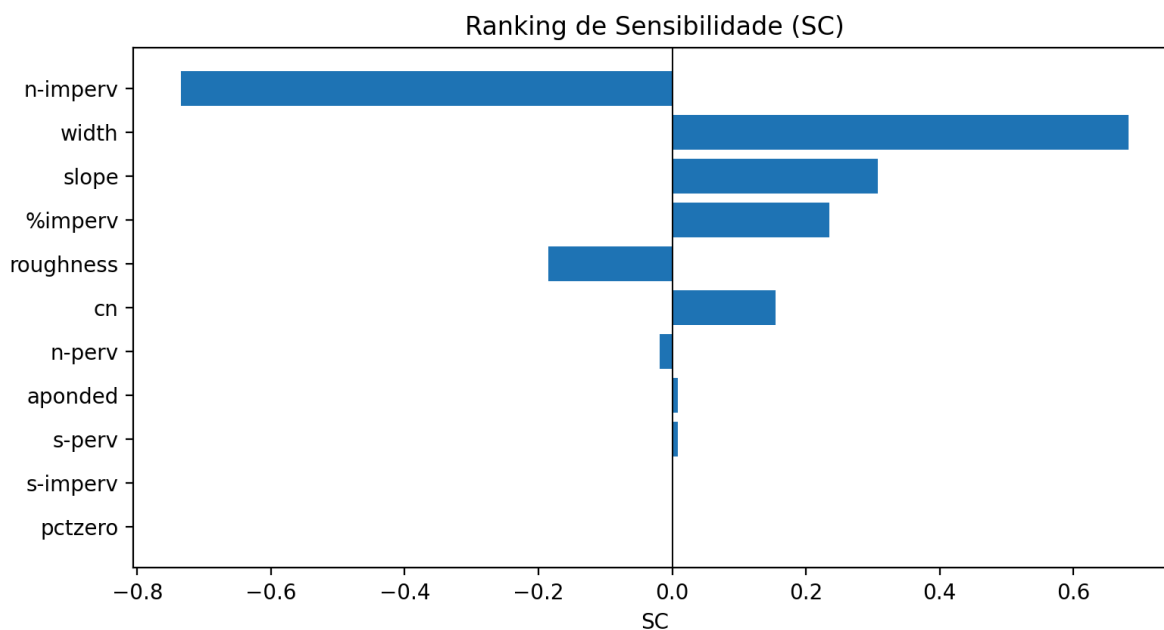
sensibilidade; X é o valor-base do parâmetro; Y é a saída prevista para o parâmetro de controle; X_2 e X_1 são, respectivamente, os valores máximo e mínimo do parâmetro; e Y_2 e Y_1 são, respectivamente, os valores correspondentes de saída para as entradas X_2 e X_1 .

Tabela 06 - Resultados da análise de sensibilidade.

Parâmetro	X	X1	X2	Y	Y1	Y2	SC	SC
<i>n-imperv</i>	0,015	0,012	0,018	111,498	133,349	100,572	-0,735	0,735
<i>width</i>	570,930	456,744	685,117	111,498	97,977	128,438	0,683	0,683
<i>slope</i>	6,388	5,111	7,666	111,498	104,343	118,045	0,307	0,307
<i>%imperv</i>	50,778	40,622	56,813	111,498	106,113	114,477	0,235	0,235
<i>roughness</i>	0,024	0,019	0,028	111,498	117,301	109,027	-0,186	0,186
<i>cn</i>	83,653	66,922	95,053	111,498	109,465	115,275	0,155	0,155
<i>n-perv</i>	0,200	0,160	0,240	111,498	111,970	111,144	-0,019	0,019
<i>aponded</i>	100,000	0,000	2.500,000	111,498	82,426	106,572	0,009	0,009
<i>s-perv</i>	5,100	2,540	7,620	111,498	110,449	111,400	0,009	0,009
<i>s-imperv</i>	1,800	1,270	2,540	111,498	111,498	111,498	0,000	0,000
<i>pctzero</i>	50,000	0,000	100,000	111,498	111,498	111,498	0,000	0,000

Fonte: elaborada pela autora, 2025.

A Figura 39 ilustra um *ranking* dos coeficientes de sensibilidade (SC). Optou-se por considerar a vazão de pico como parâmetro Y. Logo, os parâmetros que apresentaram maior SC são aqueles que mais influenciam na vazão de pico.

Figura 39 - *Ranking* de coeficientes de sensibilidade (SC).

Fonte: elaborado pela autora, 2025.

A partir desses resultados, foram selecionados os parâmetros *n-imperv*, largura, declividade, *%imperv*, rugosidade, *CN* e *n-perv* para a etapa de calibração e validação. O parâmetro *n-perv* foi escolhido por questão de coerência: julgou-se que, uma vez que *n-imperv* seria calibrado, *n-perv* também deveria ser.

Brighenti *et al.* (2017) realizaram uma análise de sensibilidade global, nas escalas temporal e espacial, em um modelo *SWAT* com o objetivo de reduzir os parâmetros necessários para a simulação. Inicialmente, foram analisados trinta e três parâmetros, dos quais vinte e três apresentaram sensibilidade em pelo menos uma das simulações. Dentre esses vinte e três parâmetros, entretanto, seis foram consistentemente sensíveis em todas as simulações: *CN* inicial para condição II de umidade do solo; condutividade efetiva do canal principal; coeficiente de Manning no canal principal; comprimento médio do canal principal; intervalo de tempo para a recarga do aquífero; e limite de água do aquífero raso para ocorrer o fluxo de retorno.

De forma resumida, Brighenti *et al.* (2017) identificaram que os parâmetros relacionados ao processo de escoamento superficial, ao canal principal e ao comportamento subterrâneo da água são os mais sensíveis para o seu estudo.

Fava (2019) também realizou uma análise de sensibilidade para determinar os parâmetros a serem calibrados e os quatro parâmetros mais sensíveis foram: porcentagem de áreas impermeáveis, rugosidade, largura e *CN*.

Tais comportamentos se repetem na presente investigação: *n-imperv*, largura, declividade, *%imperv*, *CN* e *n-perv* estão relacionados ao escoamento superficial, enquanto a rugosidade está relacionada ao canal. Os parâmetros de comportamento subterrâneo da água não foram considerados. Além disso, os quatro parâmetros mais sensíveis de Fava (2019) também estão presentes entre os parâmetros mais sensíveis deste estudo.

4.6. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

4.6.1. ETAPA PRÉ-CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

Os resultados de *NSE* para os pontos de controle da etapa de pré-calibração, ou seja, com o modelo com os parâmetros iniciais, estão apresentados na Tabela 07.

Tabela 07 - Resultados de *NSE* na etapa de pré-calibração.

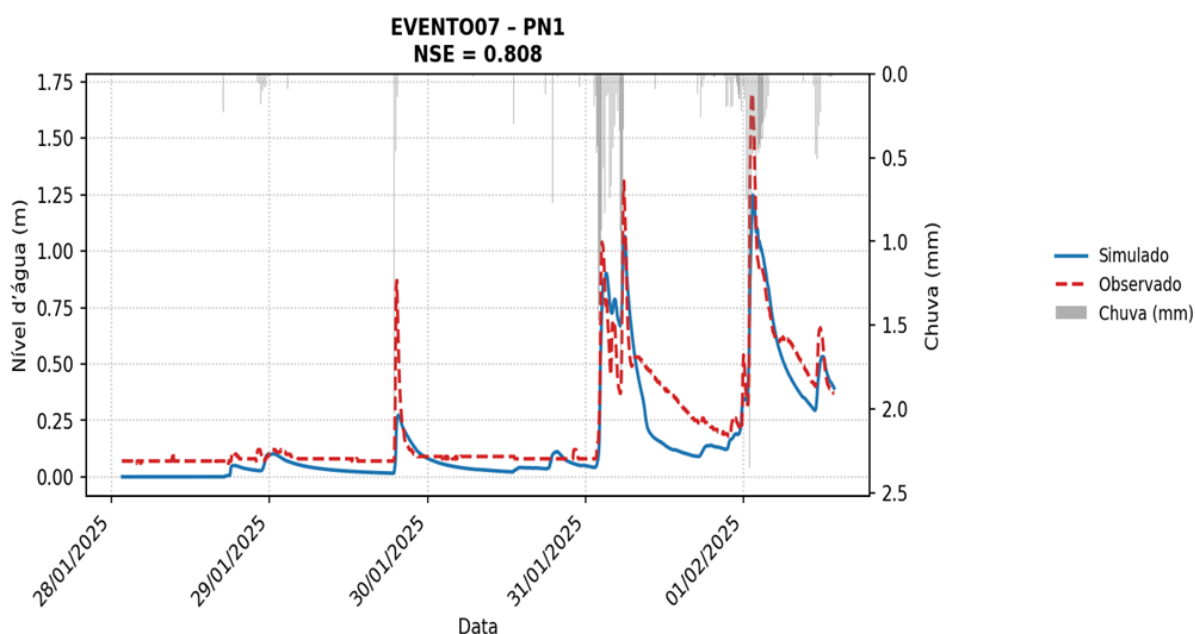
NÓ	EVENTOS								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
N1	0,133	0,743	0,608	0,821	0,572	-1,642	0,564	-255,338	0,732
N2	-3,073	-0,140	-2,859	0,380	-1,760	-9,571	-0,661	-0,563	-0,118
N3	0,565	0,578	0,657	0,136	0,314	0,480	0,413	-1,657	0,537
N4	-0,803	-2567,038	-1305,214	-398,404	-3182,383	-2,55954 E+31	-3840,773	-3,09847 E+31	-453,452
PN1	0,477	0,734	0,678	0,761	0,400	-0,492	0,808	-7,758	0,744

Fonte: elaborada pela autora, 2025.

É importante notar que valores negativos de *NSE* indicam que a previsão do modelo tem pior desempenho do que utilizar a média dos resultados observados. Quando o valor de *NSE* é igual a um, esse é o modelo perfeito.

Dentre os quarenta e cinco hidrogramas (cinco pontos de controle e nove eventos simulados) que comparam os resultados simulados e observados, o hidrograma da Figura 40 foi escolhido como exemplo para apresentar nesta dissertação.

Figura 40 - Hidrograma de PN1 para o Evento 07 (antes da calibração).



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Essa etapa foi fundamental para identificar possíveis problemas na rede de monitoramento. A estação N4, que apresentou valores consistentemente inadequados de *NSE*, foi verificada de maneira mais aprofundada e notou-se que existia um problema na coleta de dados: todos os dados observados em N4, do evento 02 ao evento 09, apresentaram exatamente o mesmo valor (0,04 metro) em todos os intervalos de tempo. Isso fez com que os dados da estação N4 fossem descartados para esta pesquisa.

A estação N2 apresentou, no geral, valores negativos de NSE. Mas isso indica a necessidade de calibração do modelo, e não a falha na rede de monitoramento. As estações N1, N3 e PN1 apresentaram, majoritariamente, valores positivos; ou seja, o modelo obteve resultados melhores do que utilizar a média dos dados observados. Outro ponto a se destacar é que, em geral, o modelo apresentou um bom desempenho em identificar os tempos de pico.

Resumidamente, a etapa de pré-calibração e validação comprovou a necessidade de calibração e validação do modelo, visando aproximar de 1 os valores de *NSE* das estações N1, N2, N3 e PN1. Optou-se por verificar apenas o nível d'água neste momento, uma vez que seu principal objetivo foi gerar um panorama da qualidade do modelo desenvolvido com relação aos dados de monitoramento. Para etapas posteriores, foram utilizados dados de nível d'água e de vazão.

4.6.2. ETAPA DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

A etapa de classificação das chuvas teve os resultados apresentados na Tabela 08. A intensidade no método *AMS* consiste na maior chuva em uma hora dentro do evento. Já para o método *UK*, a intensidade selecionada consiste na maior chuva em seis minutos em todo o evento. Para tornar a classificação mais representativa, os cálculos foram realizados com a média dos valores de chuva das quarenta e nove sub-bacias analisadas. Todas as chuvas são pesadas ou moderadas.

Tabela 08 - Classificação e tipo de evento de precipitação.

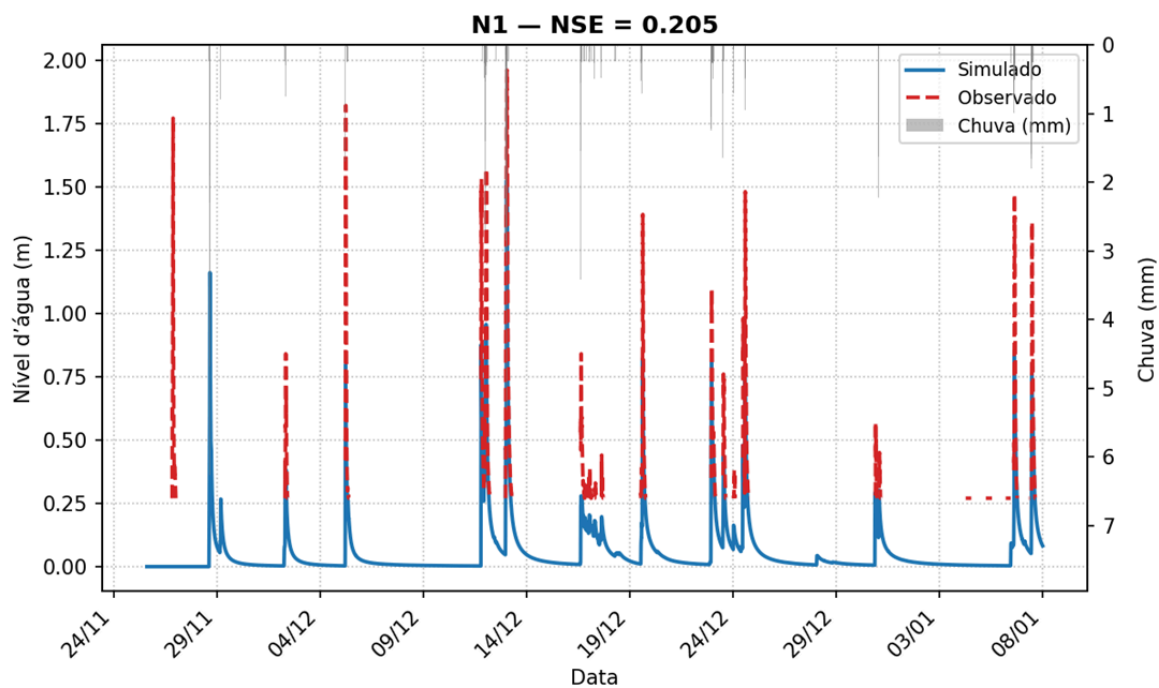
Evento	Data real de início	Data real de término	Intensidade (mm/h) - AMS	Intensidade (mm/h) - UK	Classificação AMS	Classificação UK	Tipo de evento
1	2024-10-31 15:50:00	2024-11-04 05:25:00	6,33	1,73	Chuva pesada	Chuva moderada	VALIDAÇÃO
2	2024-11-25 14:50:00	2024-11-29 04:30:00	13,85	3,06	Chuva pesada	Chuva moderada	CALIBRAÇÃO
3	2024-12-10 17:55:00	2024-12-14 07:25:00	9,68	2,26	Chuva pesada	Chuva moderada	CALIBRAÇÃO
4	2024-12-17 13:55:00	2024-12-22 09:25:00	26,77	5,20	Chuva pesada	Chuva pesada	CALIBRAÇÃO
5	2024-12-26 15:55:00	2025-01-04 02:10:00	21,46	4,12	Chuva pesada	Chuva pesada	CALIBRAÇÃO
6	2025-01-19 20:55:00	2025-01-23 10:45:00	5,69	1,50	Chuva moderada	Chuva moderada	CALIBRAÇÃO
7	2025-01-28 01:35:00	2025-02-01 13:45:00	18,98	3,39	Chuva pesada	Chuva moderada	VALIDAÇÃO
8	2025-02-15 14:45:00	2025-02-21 06:50:00	6,61	2,85	Chuva moderada	Chuva moderada	VALIDAÇÃO
9	2025-04-21 19:05:00	2025-04-26 04:50:00	23,90	4,50	Chuva pesada	Chuva pesada	CALIBRAÇÃO

Fonte: elaborada pela autora, 2025.

Conforme mencionado anteriormente, a divisão entre CALIBRAÇÃO e VALIDAÇÃO foi feita através de sorteio, com exceção do Evento 01, que foi fixado como VALIDAÇÃO.

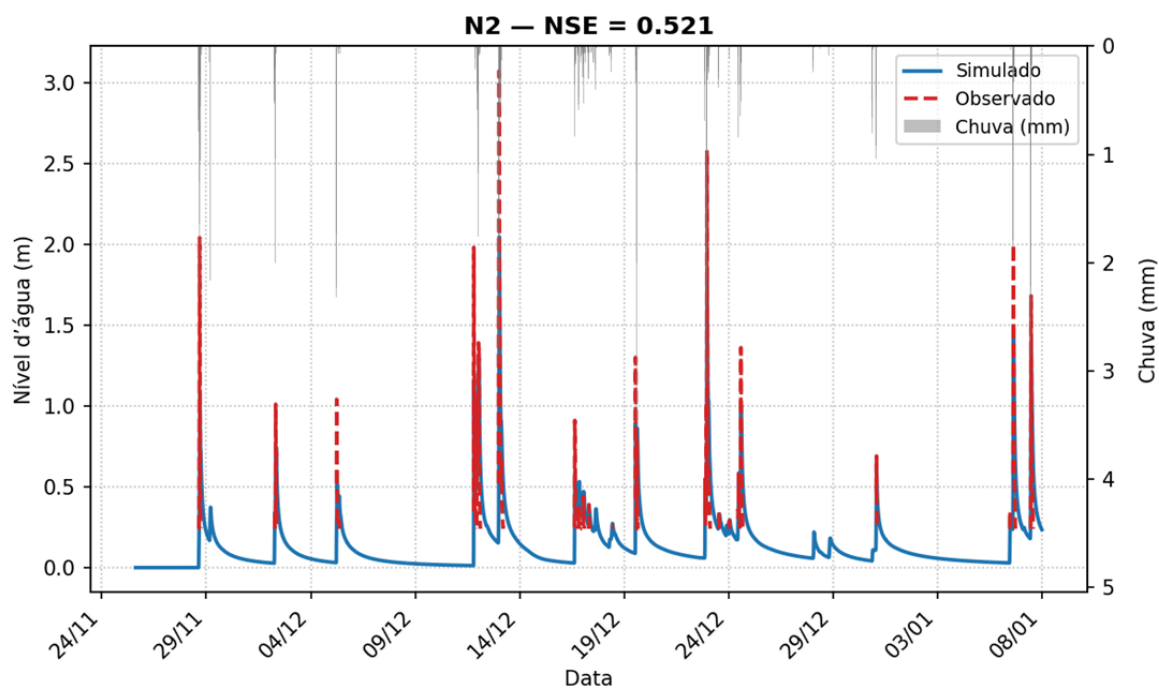
A concatenação em um único evento das informações de nível d'água dos nove eventos selecionados, que considera o *offset* entre o fundo do canal e o nível do sensor, resultou nas Figuras 41 a 44. Ao analisar estas figuras, fica evidente a necessidade de adicionar uma vazão de base ao modelo.

Figura 41 - Hidrograma do evento concatenado em N1.

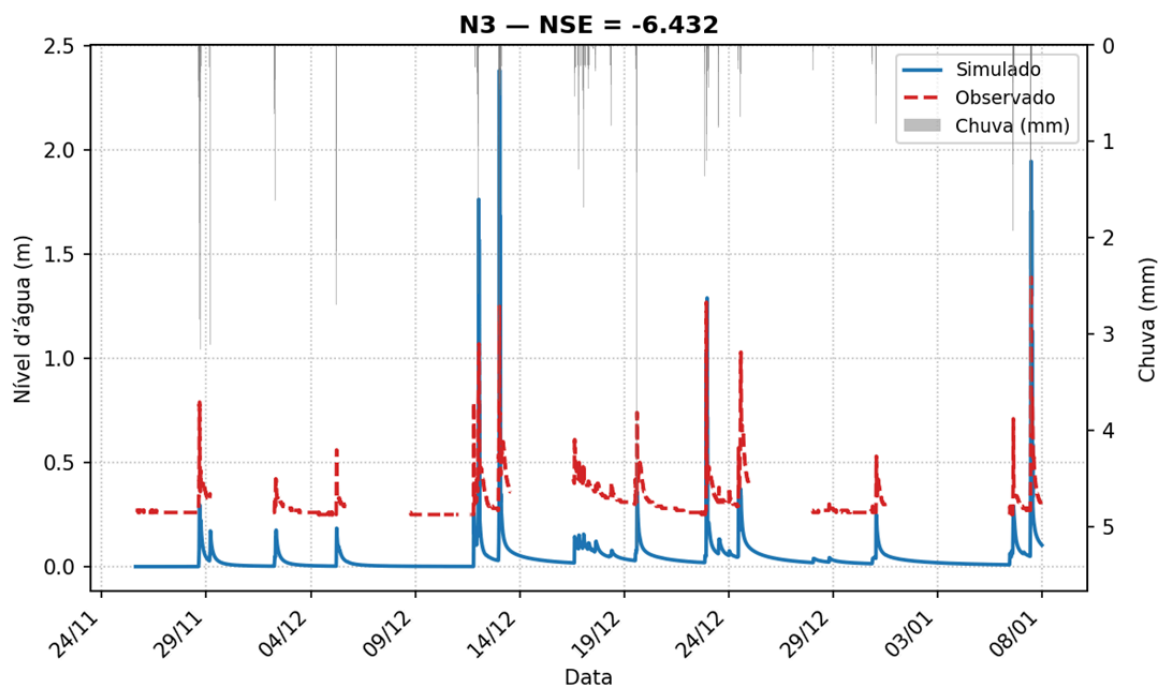


Fonte: elaborado pela autora, 2025.

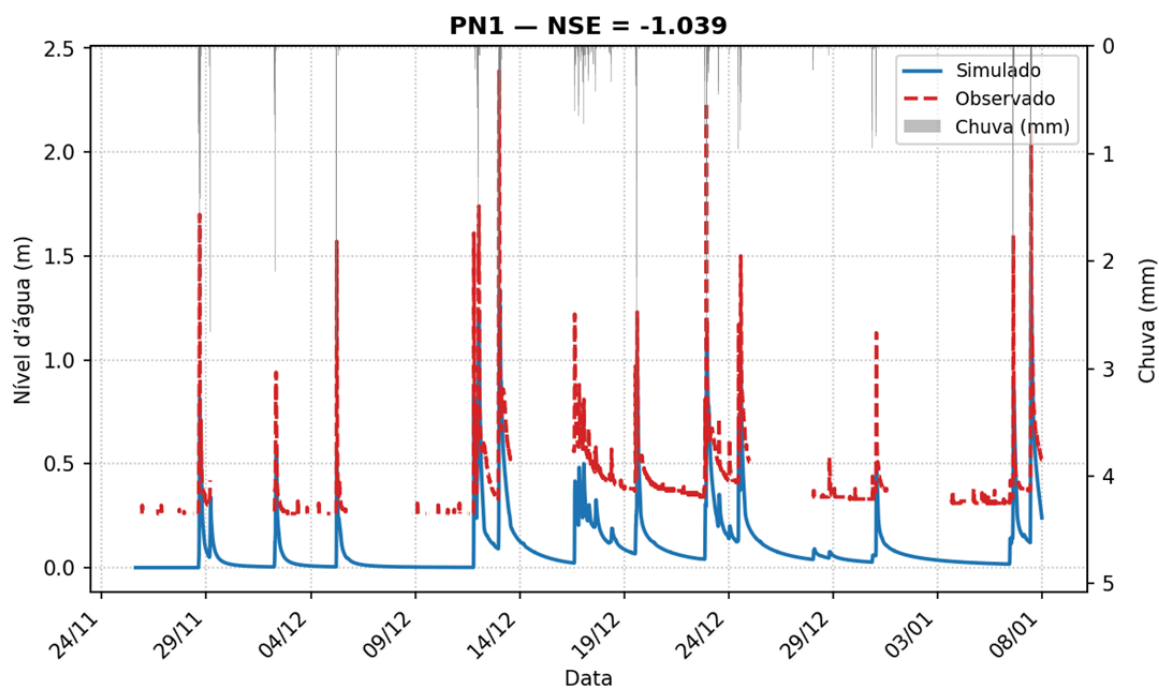
Figura 42 - Hidrograma do evento concatenado em N2.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Figura 43 - Hidrograma do evento concatenado em N3.

Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Figura 44 - Hidrograma do evento concatenado em PN1.

Fonte: elaborado pela autora, 2025.

O cálculo das vazões de *dry weather*, com o objetivo de evitar que o modelo saia do nível zero e retorne ao valor zero de nível d'água após eventos de chuva, resultou na Tabela 09.

Tabela 09 - Vazões de tempo seco.

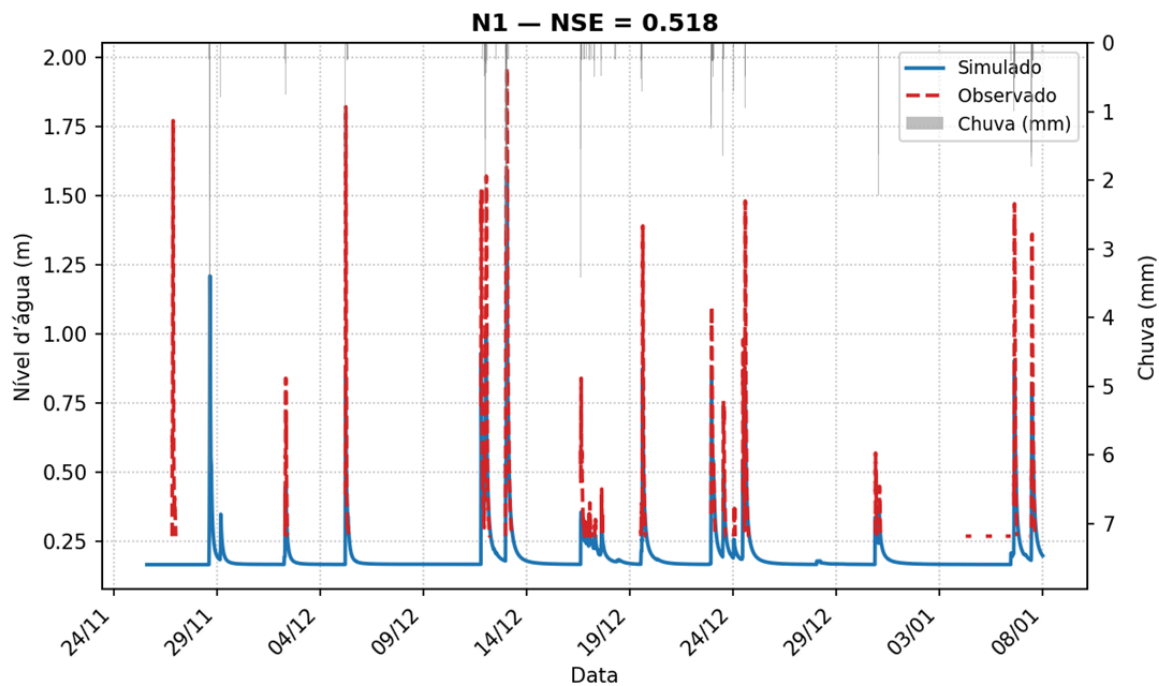
CÓRREGO	SUB-BACIA	JUNÇÃO	ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO (ha)	VAZÃO NO NÓ (m^3/s)
MINEIRINHO	SBMI01	JMI01	84,75	0,1829
	SBMI02	JMI03	463,48	1,0000
	SBMI03	JMI07	1,56	0,0034
LAZZARINI	SBL01	JL01	105,09	0,2267
	SBL02	JL05	26,69	0,0576
	SBL03	JL07	38,88	0,0839
SORREGOTTI	SBS01	JS01	143,05	0,3086
GREGÓRIO	SBG01	JG01	346,3	0,7472
	SBG02	JG06	106,11	0,2289
	SBG03	JG11	94,74	0,2044
	SBG04	JG18	79,61	0,1718
	SBG05	JG27	91,57	0,1976
	SBG06	JG39	96,06	0,2073
	SBG07	JG40	551,5	1,1899
	SBG08	JG42	107,35	0,2316
	SBG09	JG46	130,73	0,2821
	SBG10	JG48	20,84	0,0450
TIJUCO	SBTP01	JTP01	57,86	0,1248
	SBTP02	JTP03	51,44	0,1110
	SBTP03	JTP07	43,72	0,0943
	SBTP04	JTP09	18,05	0,0389
	SBTP05	JTP10	57,67	0,1244
	SBTP06	JTP12	64,53	0,1392
	SBTP07	JTP15	56,78	0,1225
	SBTP08	JTP17	1,53	0,0033
SANTA MARIA	SBSML01	JSML01	816,45	1,7616
	SBSML02	JSML06	245,44	0,5296
	SBSML03	JSML11	18,71	0,0404
	SBSML04	JSML14	44,97	0,0970

CÓRREGO	SUB-BACIA	JUNÇÃO	ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO (ha)	VAZÃO NO NÓ (m^3/s)
	SBSML05	JSML16	33,23	0,0717
	SBSML06	JSML18	10,65	0,0230
MONJOLINHO	SBM01	JM01	1069,16	2,3068
	SBM02	JM02	748,38	1,6147
	SBM03	JM03	842,64	1,8181
	SBM04	JM04	104	0,2244
	SBM05	JM06	7,35	0,0159
	SBM06	JM07	83,8	0,1808
	SBM07	JM10	401,73	0,8668
	SBM08	JM12	112,46	0,2426
	SBM09	JM16	13,99	0,0302
	SBM10	JM18	131,09	0,2828
	SBM11	JM20	32,23	0,0695
	SBM12	JM22	3,7	0,0080
	SBM13	JM26	25,38	0,0548
	SBM14	JM30	40,44	0,0873
	SBM15	JM32	105,12	0,2268
	SBM16	JM36	101,5	0,2190
	SBM17	JM42	8,87	0,0191
	SBM18	JM44	29,65	0,0640

Fonte: elaborada pela autora, 2025.

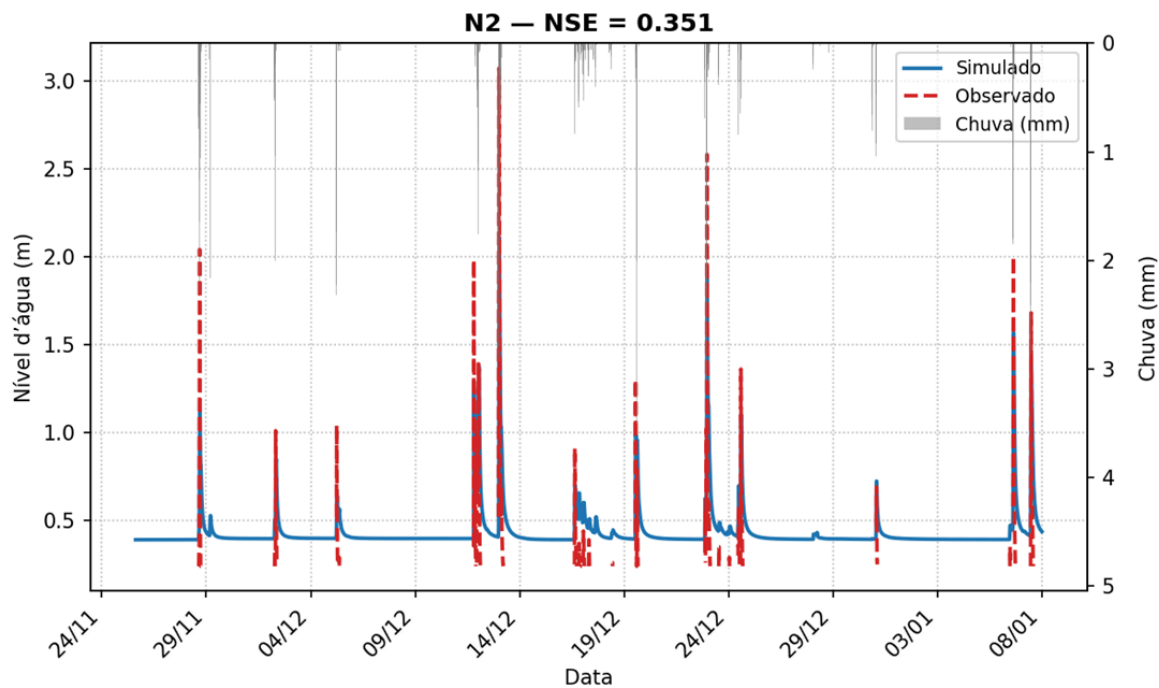
Os pontos de controle são N1 (em JMI05), N2 (em JG47), N3 (em JSML18) e PN1 (em JM32). Adicionadas as vazões de tempo seco no modelo, os novos resultados estão expressos nas Figuras 45 a 48. Ao analisar estas figuras, fica evidente a melhoria dos resultados da modelagem, inclusive com o aumento dos *NSE* de todos os pontos de controle.

Figura 45 - Hidrograma do evento concatenado em N1, com vazão de tempo seco.

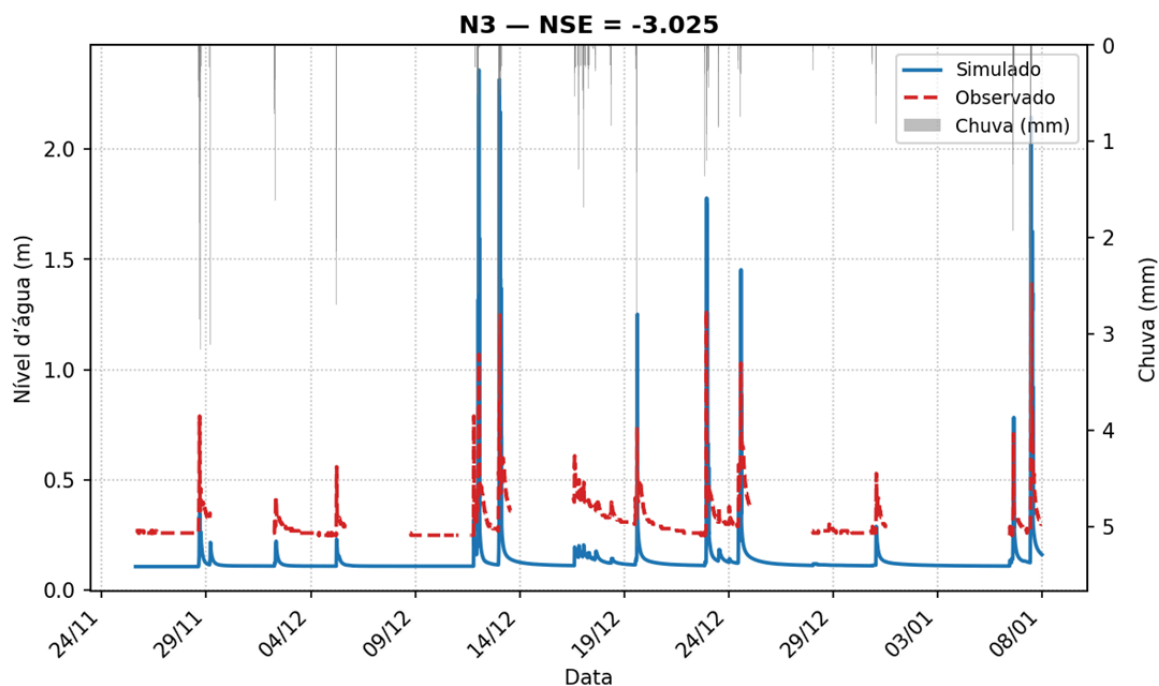


Fonte: elaborado pela autora, 2025.

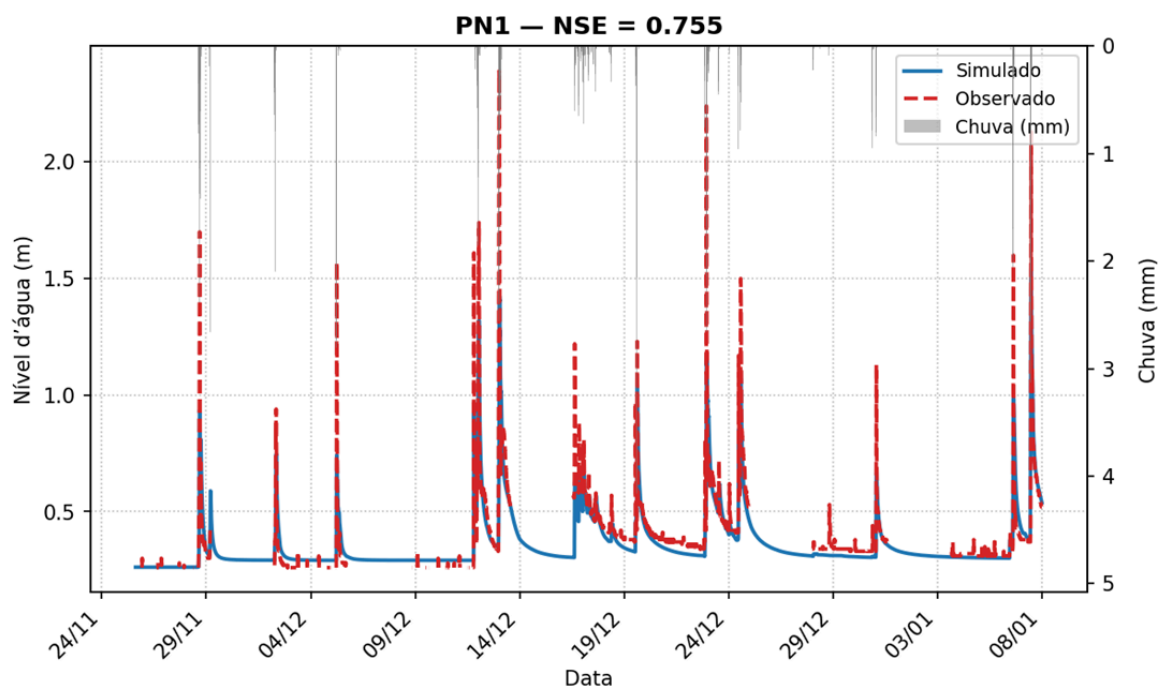
Figura 46 - Hidrograma do evento concatenado em N2, com vazão de tempo seco.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Figura 47 - Hidrograma do evento concatenado em N3, com vazão de tempo seco.

Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Figura 48 - Hidrograma do evento concatenado em PN1, com vazão de tempo seco.

Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Com esses novos hidrogramas, foi possível testar diferentes vazões, visando a uma calibração manual do modelo para diminuir a diferença entre os dados simulados e os observados. Os valores encontrados estão na Tabela 10.

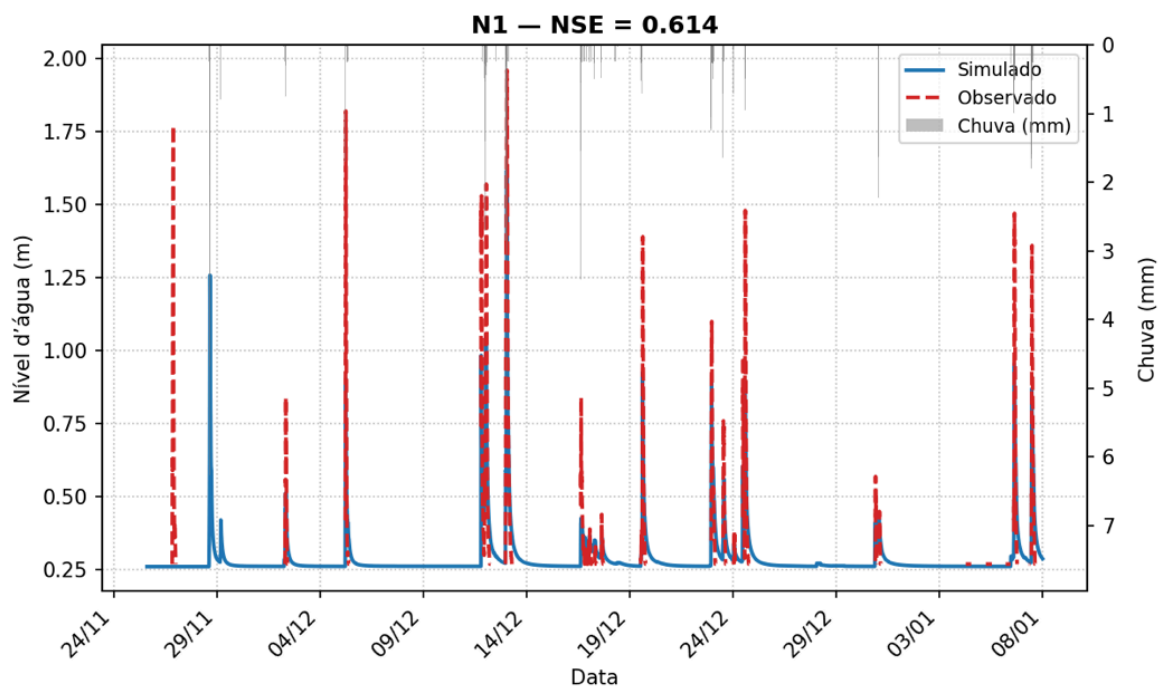
Tabela 10 - Vazões de tempo seco calibradas.

CÓRREGO	SUB-BACIA	JUNÇÃO	ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO (ha)	VAZÃO NO NÓ (m^3/s)
MINEIRINHO	SBMI01	JMI01	84,75	0,3657
	SBMI02	JMI03	463,48	2,0000
	SBMI03	JMI07	1,56	0,0067
LAZZARINI	SBL01	JL01	105,09	0,2267
	SBL02	JL05	26,69	0,0576
	SBL03	JL07	38,88	0,0839
SORREGOTTI	SBS01	JS01	143,05	0,3086
GREGÓRIO	SBG01	JG01	346,3	0,1245
	SBG02	JG06	106,11	0,0382
	SBG03	JG11	94,74	0,0341
	SBG04	JG18	79,61	0,0286
	SBG05	JG27	91,57	0,0329
	SBG06	JG39	96,06	0,0345
	SBG07	JG40	551,5	0,1983
	SBG08	JG42	107,35	0,0386
	SBG09	JG46	130,73	0,0470
	SBG10	JG48	20,84	0,0075
TIJUCO	SBTP01	JTP01	57,86	0,0250
	SBTP02	JTP03	51,44	0,0222
	SBTP03	JTP07	43,72	0,0189
	SBTP04	JTP09	18,05	0,0078
	SBTP05	JTP10	57,67	0,0249
	SBTP06	JTP12	64,53	0,0278
	SBTP07	JTP15	56,78	0,0245
	SBTP08	JTP17	1,53	0,0007
SANTA MARIA DO LEME	SBSML01	JSML01	816,45	1,7616
	SBSML02	JSML06	245,44	0,5296
	SBSML03	JSML11	18,71	0,0404
	SBSML04	JSML14	44,97	0,0970

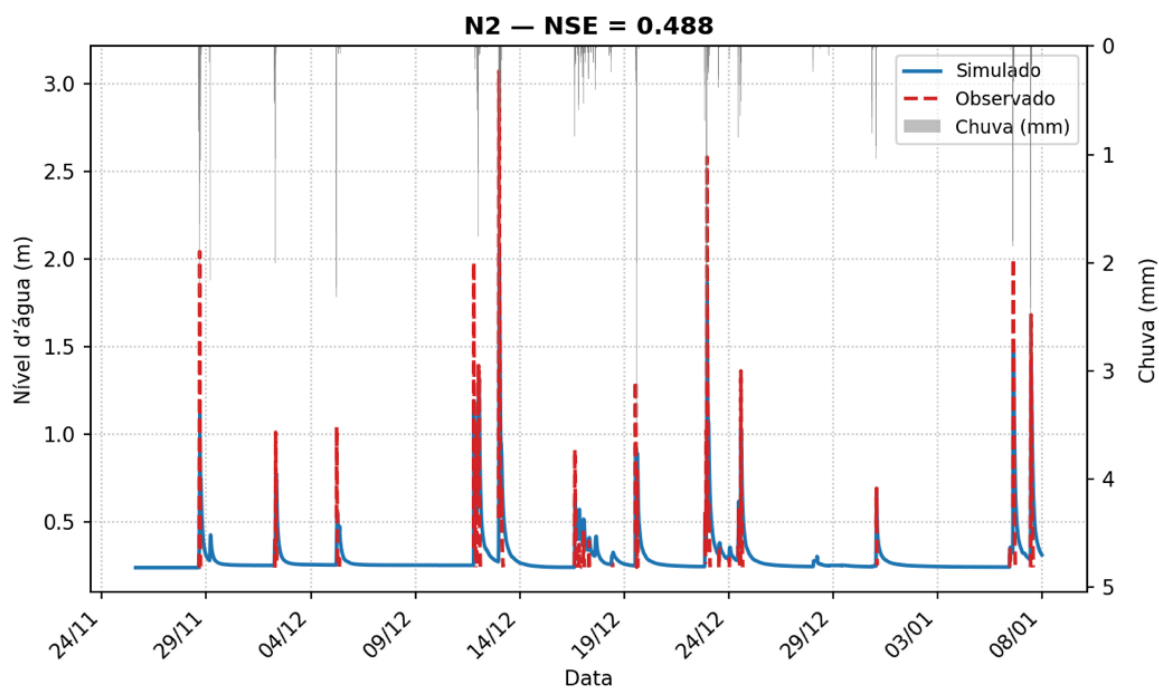
CÓRREGO	SUB-BACIA	JUNÇÃO	ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO (ha)	VAZÃO NO NÓ (m^3/s)
MONJOLINHO	SBSML05	JSML16	33,23	0,0717
	SBSML06	JSML18	10,65	0,0230
	SBM01	JM01	1069,16	0,4614
	SBM02	JM02	748,38	0,3229
	SBM03	JM03	842,64	0,3636
	SBM04	JM04	104	0,0449
	SBM05	JM06	7,35	0,0032
	SBM06	JM07	83,8	0,0362
	SBM07	JM10	401,73	0,1734
	SBM08	JM12	112,46	0,0485
	SBM09	JM16	13,99	0,0060
	SBM10	JM18	131,09	0,0566
	SBM11	JM20	32,23	0,0139
	SBM12	JM22	3,7	0,0016
	SBM13	JM26	25,38	0,0110
	SBM14	JM30	40,44	0,0175
	SBM15	JM32	105,12	0,0454
	SBM16	JM36	101,5	0,2190
SBM17	JM42	8,87	0,0191	
SBM18	JM44	29,65	0,0640	

Fonte: elaborada pela autora, 2025.

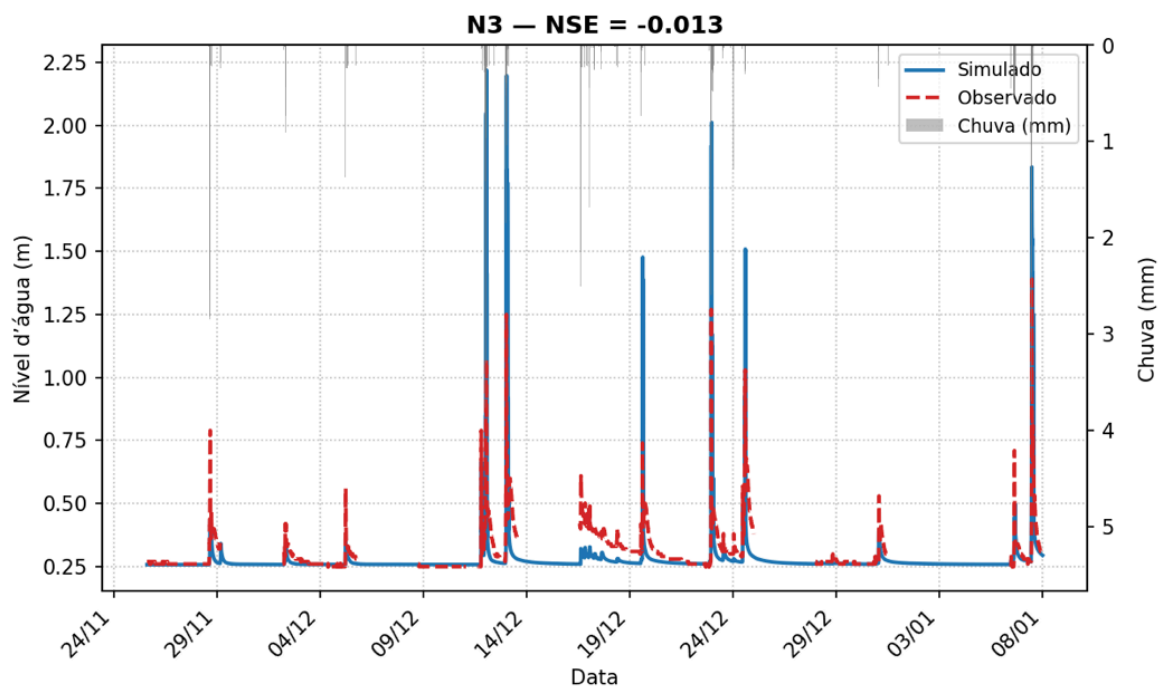
Os hidrogramas das Figuras 49 a 52 refletem os impactos da calibração manual das vazões de tempo seco. Novamente, este ajuste resultou em melhorias no *NSE* de todos os pontos de controle.

Figura 49 - Hidrograma do evento concatenado em N1, com vazão calibrada.

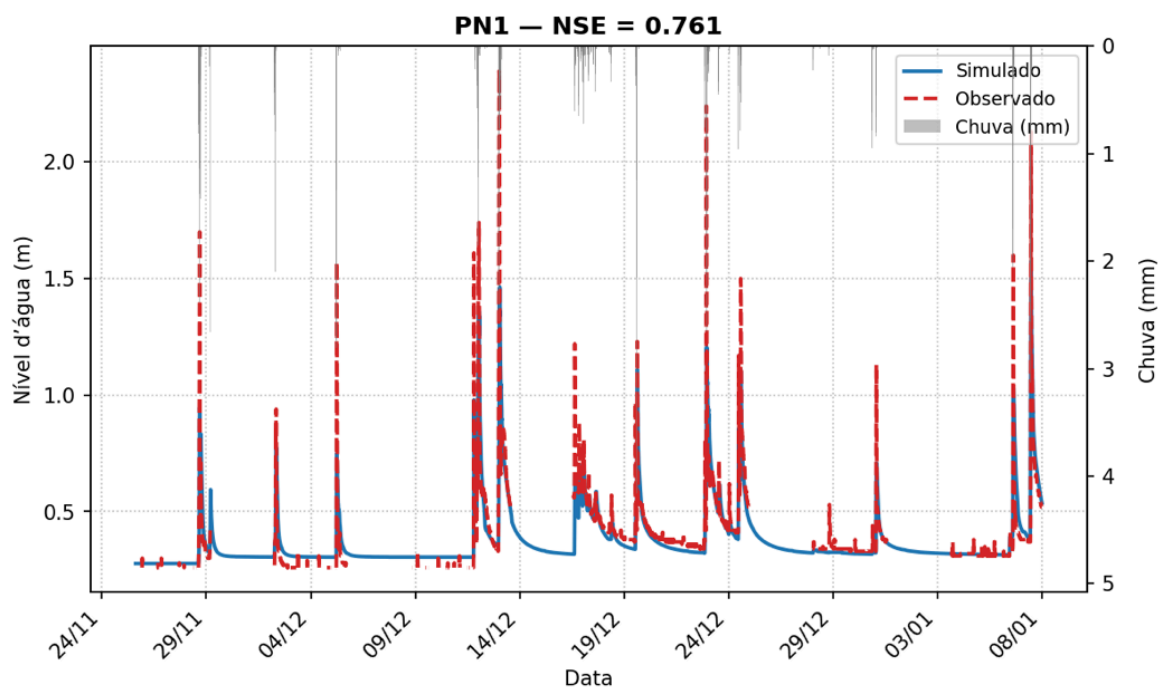
Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Figura 50 - Hidrograma do evento concatenado em N2, com vazão calibrada.

Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Figura 51 - Hidrograma do evento concatenado em N3, com vazão calibrada.

Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Figura 52 - Hidrograma do evento concatenado em PN1, com vazão calibrada.

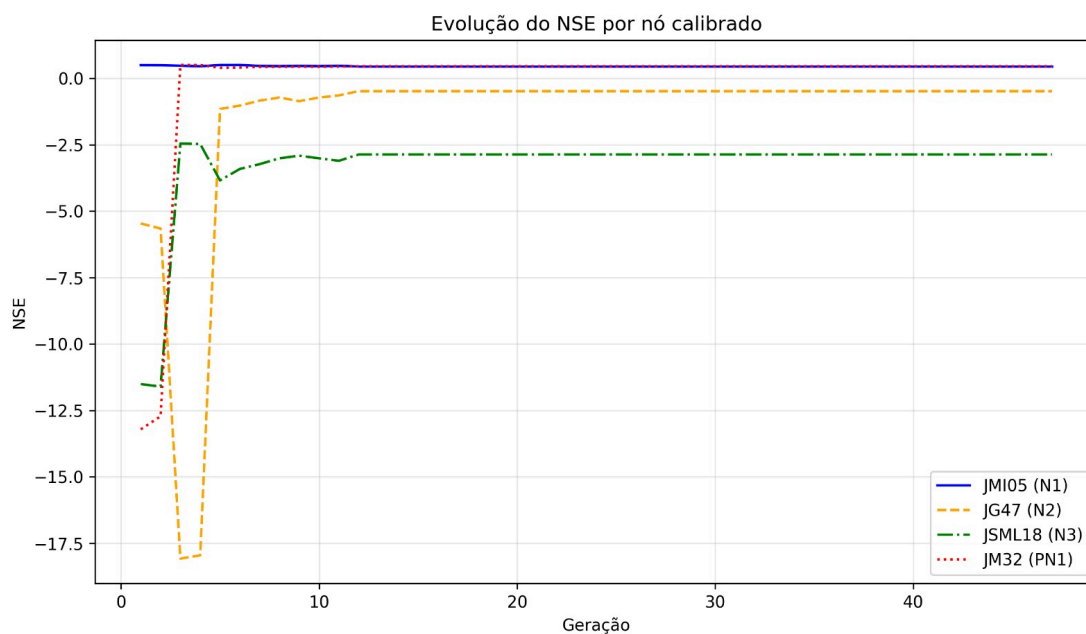
Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Conforme explicitado em (3.3.4.2), a calibração foi realizada para três cenários: **(1)** evento concatenado, mantendo a população; **(2)** evento concatenado, diminuindo a população; **(3)** Evento 04, considerando os demais eventos como validação.

O cenário **(1)** se mostrou inviável para o tempo disponibilizado de finalização desta pesquisa. Apenas para rodar a calibração, o tempo de espera variou entre duas e quatro semanas. Essa opção foi descartada. O cenário **(2)** também demorou, mas a espera variou entre uma e duas semanas. O cenário **(3)** foi o mais rápido, demorando entre três e sete dias para finalizar. Assim, serão apresentados os resultados das estratégias **(2)** e **(3)** de calibração, as quais puderam ser concluídas.

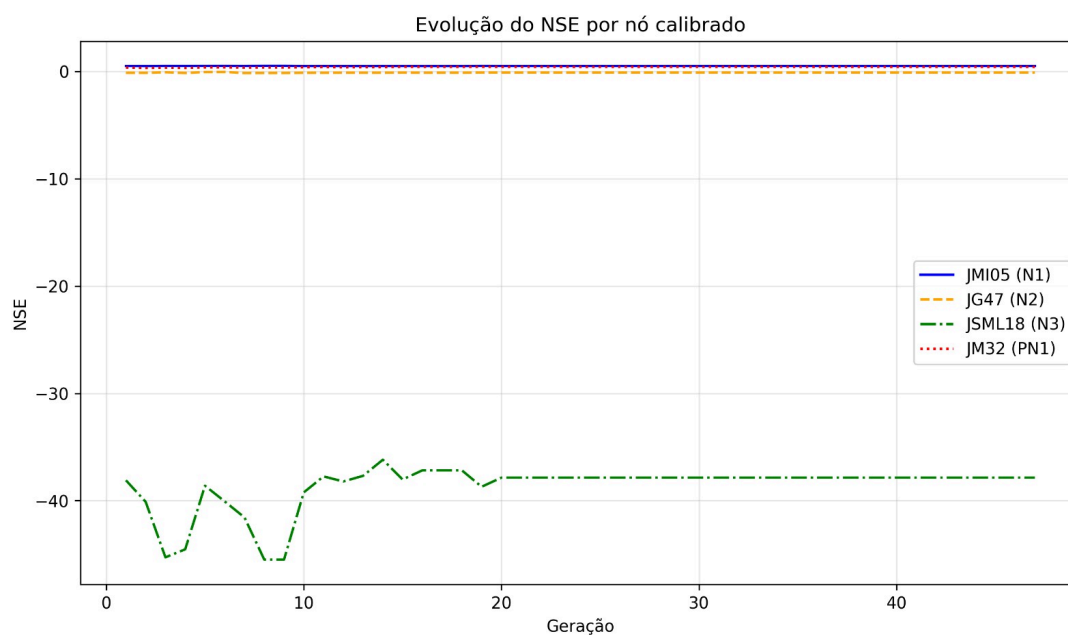
As Figuras 53 a 58 apresentam a evolução do *NSE* ao longo da calibração para os seis cenários testados (três funções objetivo - fo1, fo2 e fo3 - para cada cenário - 2 e 3).

Figura 53 - Evolução do *NSE* para o cenário 1 - fo1, com o evento concatenado (eventos 2, 3, 4, 5, 6 e 9).



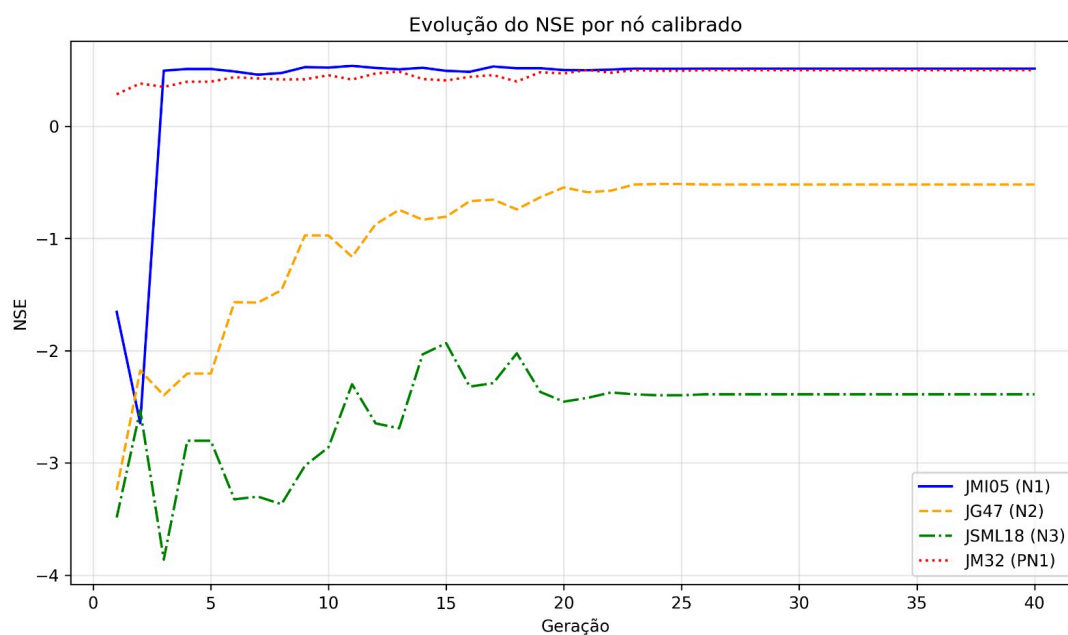
Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Figura 54 - Evolução do *NSE* para o cenário 2 - fo2, com o evento concatenado (eventos 2, 3, 4, 5, 6 e 9).



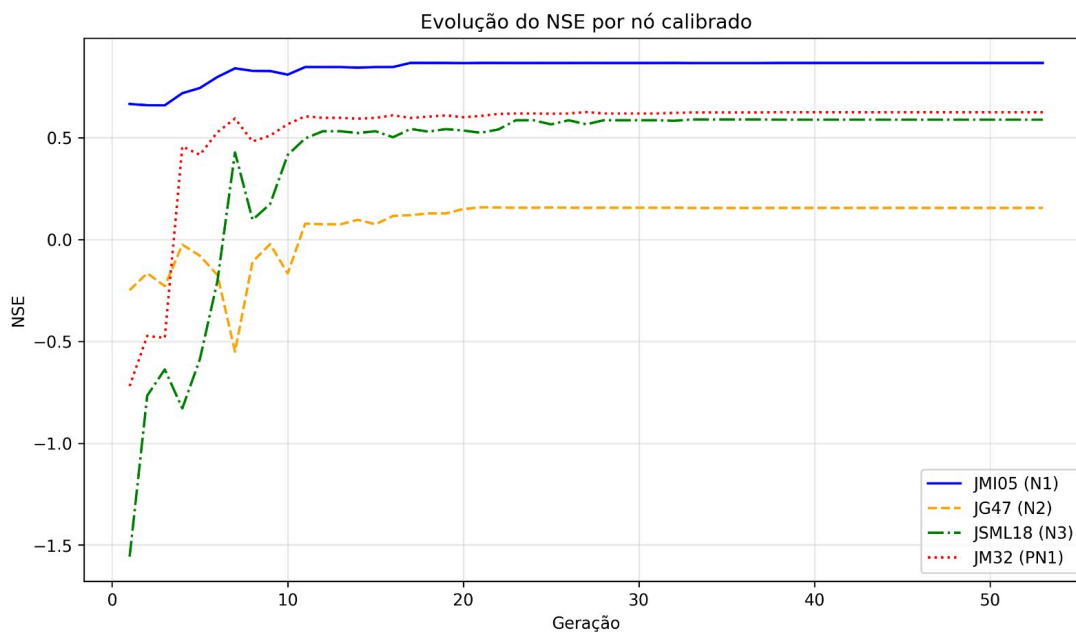
Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Figura 55 - Evolução do *NSE* para o cenário 3 - fo3, com o evento concatenado (eventos 2, 3, 4, 5, 6 e 9).



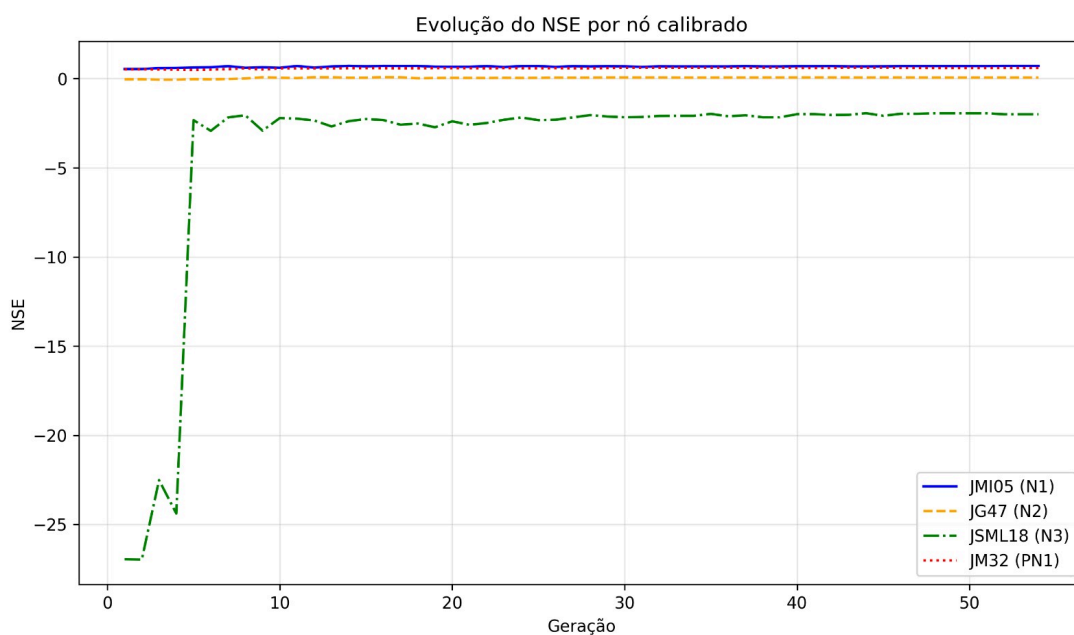
Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Figura 56 - Evolução do *NSE* para o cenário 4 - fo1, com o Evento 04 para calibração.



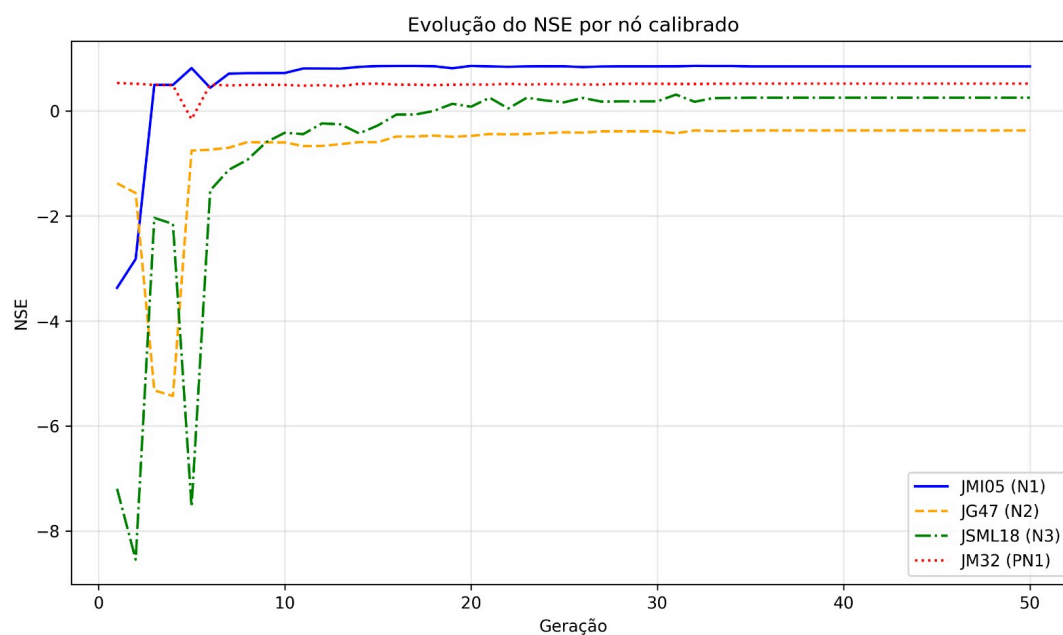
Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Figura 57 - Evolução do *NSE* para o cenário 5 - fo2, com o Evento 04 para calibração.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Figura 58 - Evolução do *NSE* para o cenário 6 - fo3, com o Evento 04 para calibração.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Dos resultados, conclui-se que a calibração automática não foi satisfatória para qualquer dos cenários. O ponto N1, no geral, melhorou. Mas os demais pontos de controle permaneceram com resultados insatisfatórios e, em alguns dos cenários, pioraram. Além disso fo1, para o Evento 04, foi o cenário que apresentou os melhores resultados.

A Tabela 11 resume os resultados da calibração para todos os cenários, utilizando o *NSE* como métrica de qualidade.

Tabela 11 - Resumo do *NSE* de cada cenário de calibração automática.

Cenário	NSE			
	N1	N2	N3	PN1
Base	0,614	0,488	-0,013	0,761
1	0,441501	-0,483070	-0,286857	0,451705
2	0,505923	-0,107510	-37,859400	0,423322
3	0,513502	-0,519120	-2,388480	0,499505
4	0,867804	0,155707	0,589201	0,625592
5	0,711984	0,060876	-2,001010	0,598513
6	0,850965	-0,369430	0,255669	0,524360

Fonte: elaborada pela autora, 2025.

Em estudos futuros, será possível explorar mais possibilidades para o calibrador, tais como permitir a execução do cenário (1) com todos os eventos concatenados e aumentar a população e/ou o número de gerações.

4.6.3. ETAPA PÓS-CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

Realizada a calibração automática, avaliou-se a necessidade de calibração manual e/ou ajustes específicos. Julgou-se que o modelo necessitava de ambos, visto que os resultados da calibração automática não foram tão bons quanto o esperado. Mas, considerando-se que a calibração melhorou o aspecto geral dos hidrogramas simulados, acertando melhor os seus picos, percebe-se a possibilidade de aproveitar as mudanças geradas pelo calibrador para as sub-bacias de montante dos pontos de controle para os quais houve melhoria do *NSE*.

Dessa forma, para a calibração montou-se o seguinte modelo:

- 1) Todos os elementos relacionados às bacias do Gregório, do Sorregotti, do Lazzarini e do Santa Maria do Leme mantiveram os parâmetros de **antes da**

calibração. Isso porque percebeu-se que os resultados antes da calibração para esses trechos foram mais adequados;

a) O *NSE* do Santa Maria do Leme melhorou após a calibração automática. Mas julgou-se que os parâmetros antes da calibração geraram hidrogramas mais representativos e picos mais próximos à realidade;

2) Para as demais bacias (Monjolinho, Mineirinho e Tijuco Preto), foram adotados os parâmetros do modelo depois da calibração (cenário 4).

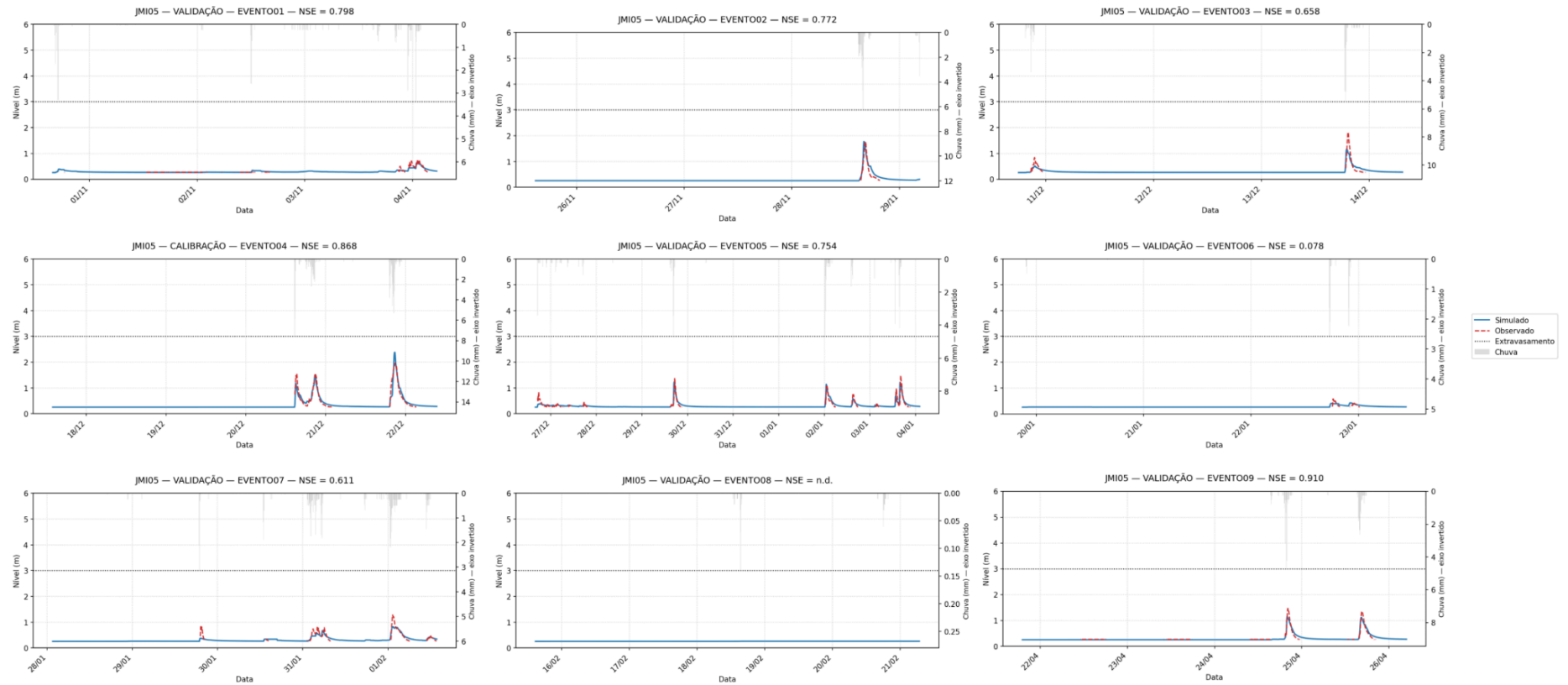
Com a montagem desse modelo, foi realizada a calibração manual dos seguintes parâmetros: *n-imperv*, largura, declividade, *%imperv*, rugosidade, *CN* e *n-perv*, seguindo os valores explicitados em (3.3.4.3) - extremos do grupo, valores aleatórios próximos do extremo de interesse, extremos dos grupos seguintes, limites físicos do parâmetro e valor original.

O principal objetivo dessa calibração manual foi aproximar os hidrogramas simulados dos observados, pois notou-se que, consistentemente, o modelo subestimou os picos dos eventos. Concluída essa etapa, foi possível gerar os oito eventos de validação, a partir do modelo calibrado automática e manualmente, para analisar a qualidade do processo.

Dos resultados, também se observou que N3 necessitou de ajustes específicos, devido ao acúmulo de resíduos no pilar onde se encontra o sensor, explicitado na Figura 32. Além disso, nota-se que alguns eventos apresentaram desempenhos inadequados (como, por exemplo, o evento 08 em N1, N3 e PN1), o que prejudicou ou impossibilitou o cálculo de *NSE*.

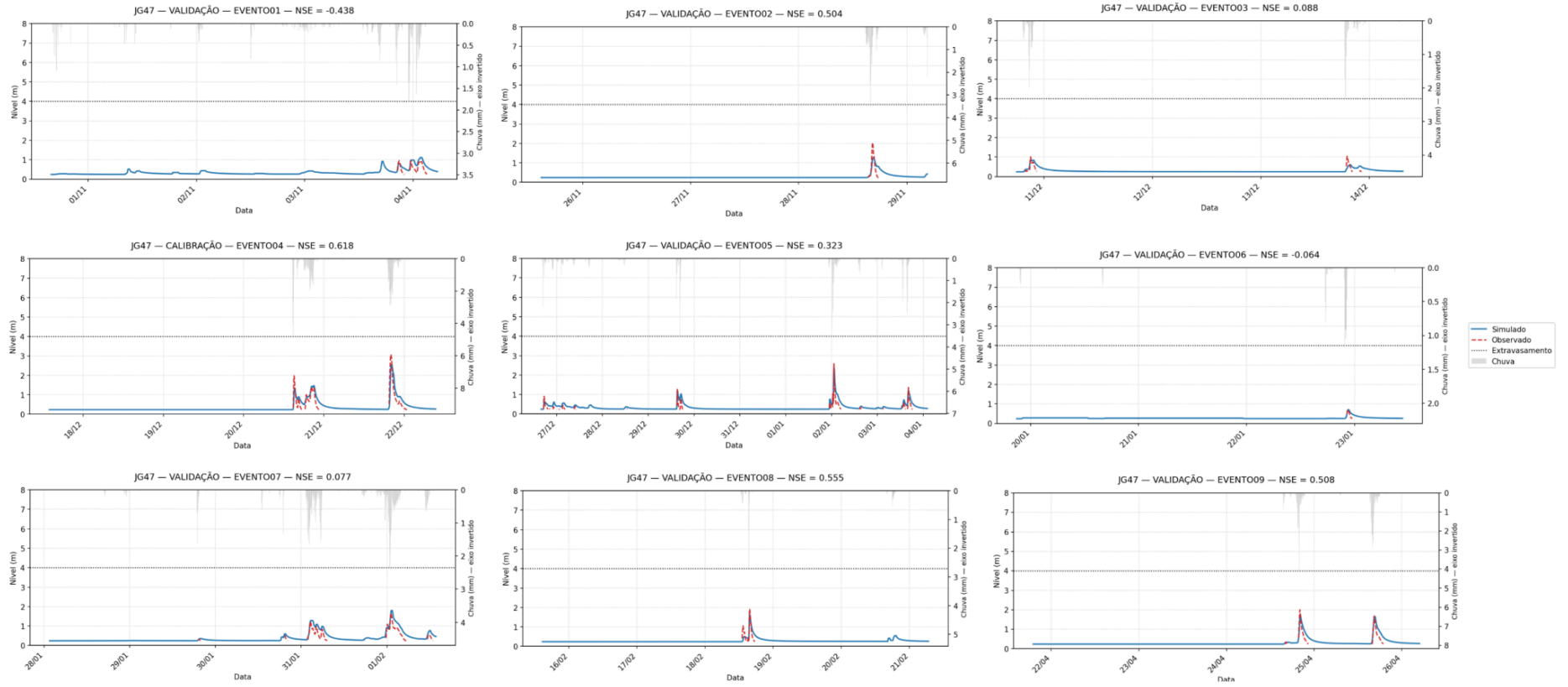
As Figuras 59 a 62 apresentam a comparação entre dados de níveis simulados e observados, bem como os valores de *NSE* para cada um dos pontos de controle, após todas as etapas discriminadas anteriormente.

Figura 59 - Hidrogramas para N1.



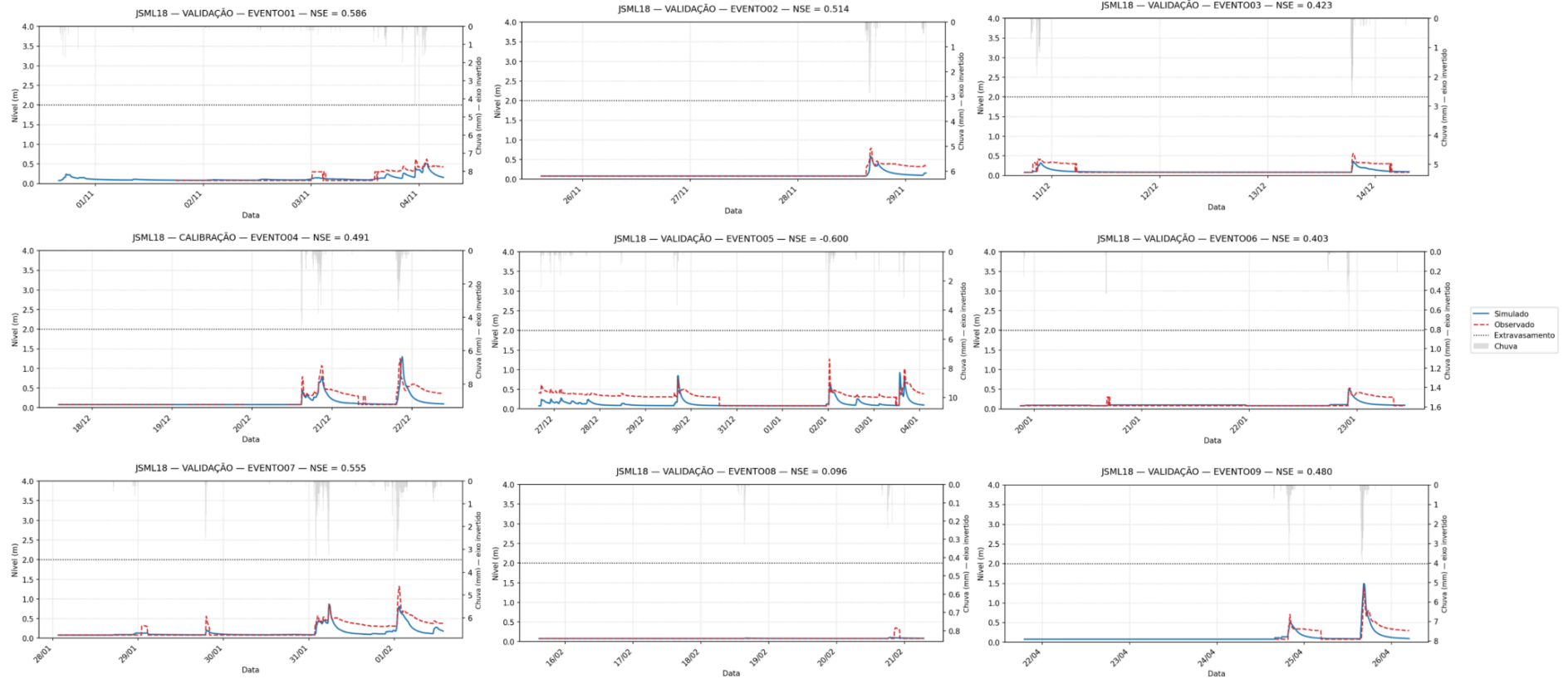
Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Figura 60 - Hidrogramas para N2.



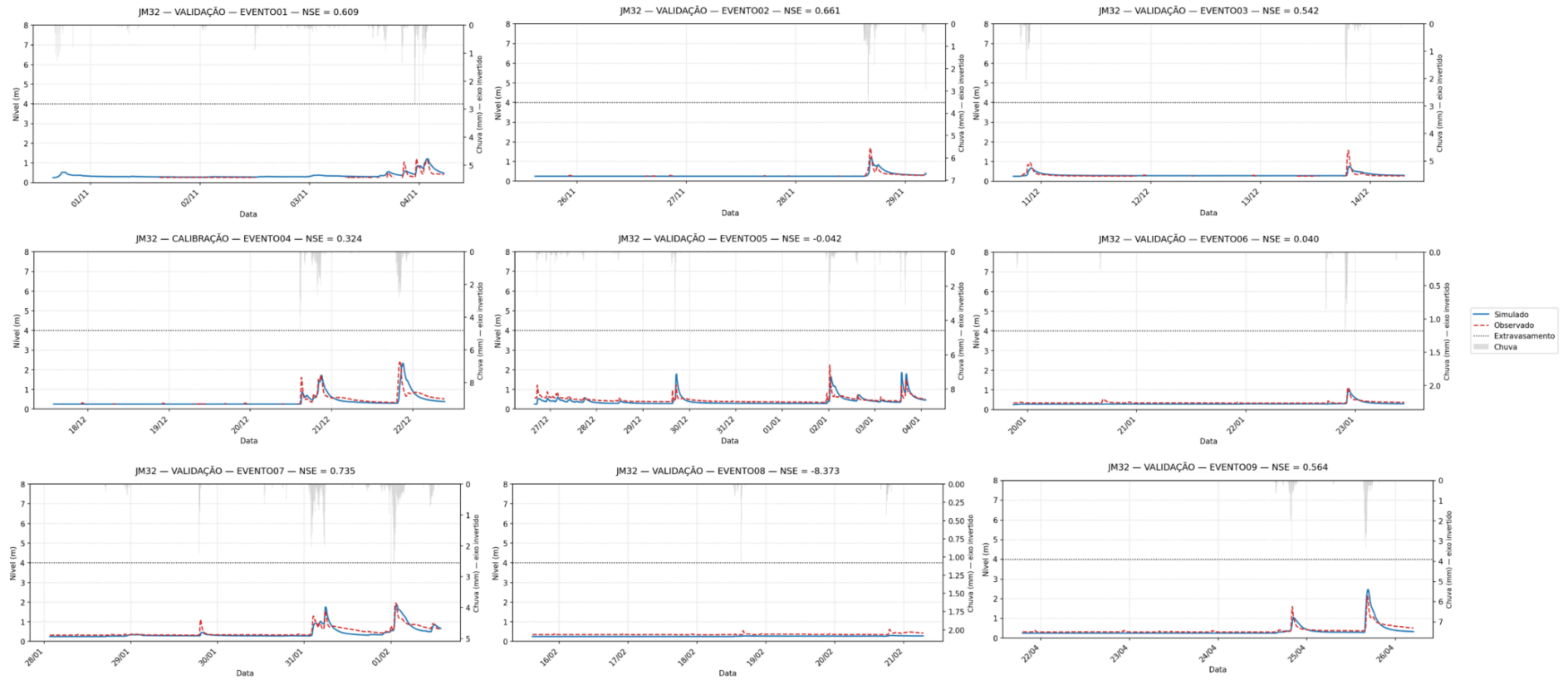
Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Figura 61 - Hidrogramas para N3.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Figura 62 - Hidrogramas para PN1.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

A Tabela 12 resume o *NSE* para todos os eventos, em todos os pontos de controle.

Tabela 12 - Resumo do *NSE* após ajustes.

Evento	N1	N2	N3	PN1	Tipo
EVENTO01	0,798	-0,438	0,586	0,609	VALIDAÇÃO
EVENTO02	0,772	0,504	0,514	0,661	VALIDAÇÃO
EVENTO03	0,658	0,088	0,423	0,542	VALIDAÇÃO
EVENTO04	0,868	0,618	0,491	0,324	CALIBRAÇÃO
EVENTO05	0,754	0,323	-0,600	-0,042	VALIDAÇÃO
EVENTO06	0,078	-0,064	0,403	0,040	VALIDAÇÃO
EVENTO07	0,611	0,077	0,555	0,735	VALIDAÇÃO
EVENTO08		0,555	0,096	-8,373	VALIDAÇÃO
EVENTO09	0,910	0,508	0,480	0,564	VALIDAÇÃO
Mínimo	0,078	-0,438	-0,600	-8,373	-
Máximo	0,910	0,618	0,586	0,735	-
Média	0,681	0,241	0,328	-0,549	-
Desvio padrão	0,263	0,352	0,376	2,947	-
Legenda	Insatisfatório	Satisfatório	Bom	Muito bom	Sem dados

Fonte: elaborada pela autora, 2025.

De modo geral, pode-se concluir que:

- 1) N1 obteve o melhor desempenho dentre todos os pontos de controle;
 - a) Com exceção dos eventos 06 e 08, todos os resultados foram satisfatórios, bons ou muito bons;
 - b) A bacia do Mineirinho teve os melhores resultados a partir da calibração automática;
- 2) N2 apresentou resultados inadequados a partir da calibração automática (o *NSE* diminuiu em relação ao modelo não calibrado);

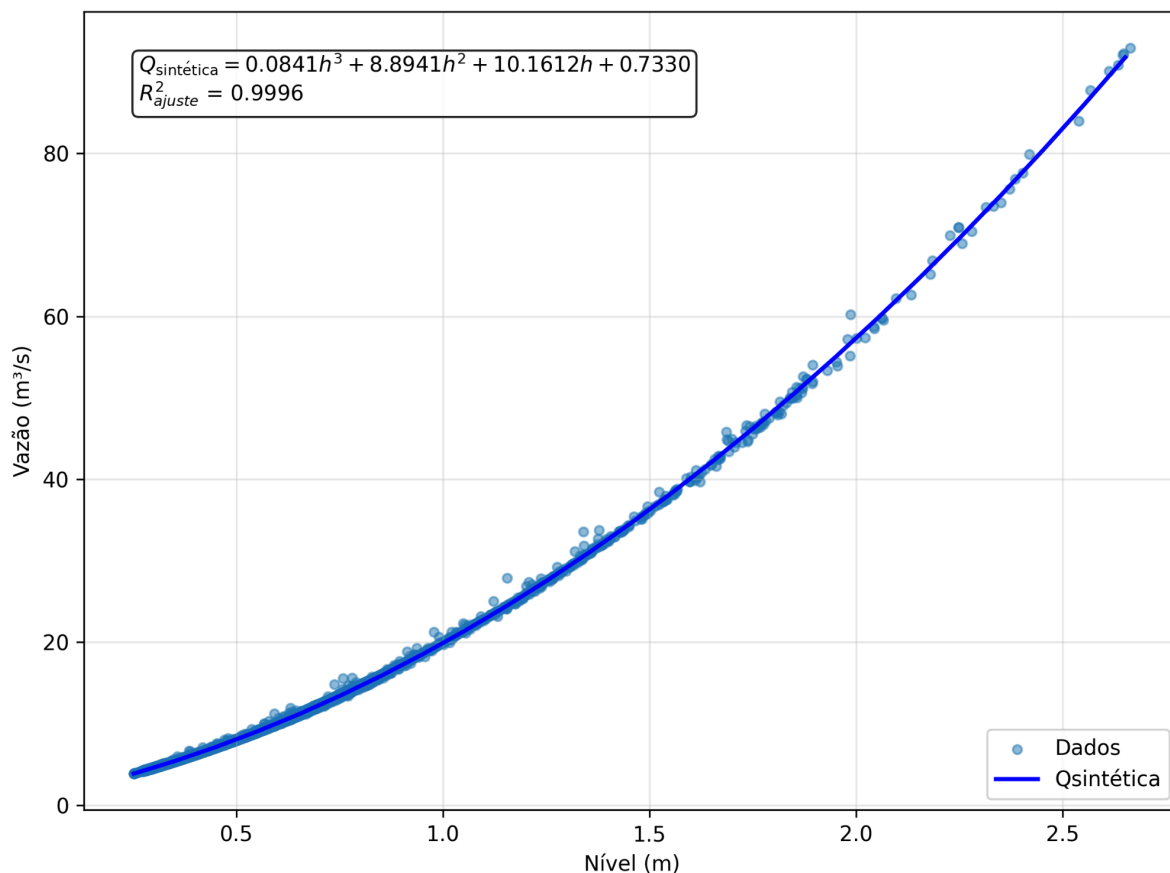
- a) Isso fez com que a calibração para esse ponto fosse inteiramente manual, o que justifica os valores menores em relação à calibração automática de N1;
 - b) Porém, é importante notar que, para o evento de calibração (Evento 04), N2 obteve um resultado satisfatório;
 - c) Quatro dos nove eventos avaliados apresentaram resultados satisfatórios. Mas, mesmo para os eventos insatisfatórios, o *NSE* resultou melhor após a calibração manual;
- 3) N3 também foi calibrado manualmente, e passou por um ajuste específico nos dados observados, para contornar o problema de acúmulo de resíduos no pilar em que se encontra o sensor (Figura 32);
- a) Os níveis observados menores do que 0,3 metro foram considerados como 0,08 metro, conforme explicado em 3.3.4.3, o que resultou no formato do hidrograma da Figura 61;
 - b) Apenas três eventos apresentaram resultados satisfatórios, mas somente um evento apresentou *NSE* negativo (ou seja, o modelo performa pior do que a média dos resultados observados);
 - c) Apesar de os *NSEs* não terem resultado altos - algo esperado dada a impossibilidade de prever os níveis d'água baixos ao longo do tempo por causa do problema nos dados observados, o que, por sua vez, interfere na correlação analisada pelo *NSE* - o modelo representa relativamente bem os picos e os tempos de pico;
- 4) PN1 performou melhor antes da calibração automática. Entretanto, optou-se por utilizar os valores da calibração, pois considerou-se que as modificações nas demais bacias, que deságuam no Monjolinho a montante deste ponto (Santa Maria do Leme e Tijuco Preto), alterariam os resultados:
- a) Cinco dos nove eventos apresentaram resultados satisfatórios e bons;
 - b) Apenas dois eventos apresentaram *NSE* negativo;

- c) As alterações nas demais sub-bacias impactaram significativamente o *NSE*, o que tornou a calibração de PN1 mais complexa e demorada. Isso também tornou necessário realizar ajustes manuais à montante do ponto de controle PN1, com exceção das sub-bacias do Santa Maria do Leme, que já tinham sido ajustados para o N3;
- 5) De modo geral, os *NSEs* não resultaram próximos a 1, mas o modelo representa, de forma satisfatória, os dados observados. Supõe-se que uma maior disponibilidade e confiabilidade nos dados observados, somado a estudos futuros dedicados exclusivamente à calibração, poderá contribuir para o aprimoramento dos resultados.

4.7. OBTENÇÃO DA CURVA-CHAVE SINTÉTICA

O ajuste dos dados simulados de nível e de vazão do modelo final resultou na Figura 63. Para esta etapa, utilizou-se unicamente o ponto de controle PN1, para o qual Barbassa (2024) desenvolveu uma curva-chave empírica. Ou seja, tomaram-se as informações obtidas por essa curva como dados reais, para fins de comparação, mesmo sabendo que qualquer curva-chave possui erros embutidos, especialmente em seus valores extremos. A curva de Barbassa (2024) está expressa na Equação (12), na seção (3.4).

Figura 63 - Ajuste de uma curva-chave para os dados simulados do modelo.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Assim, a Equação (14) apresenta a curva-chave sintética resultante, considerando as informações de vazão e nível d'água dos nove eventos de interesse concatenados.

$$Q_{SINTÉTICA} = 0,0841 * h^3 + 8,8941 * h^2 + 10,1612 * h + 0,7330 \quad (14)$$

Em que $Q_{SINTÉTICA}$ é a vazão obtida pela curva-chave sintética, em m³/s; e h é o nível d'água em metros.

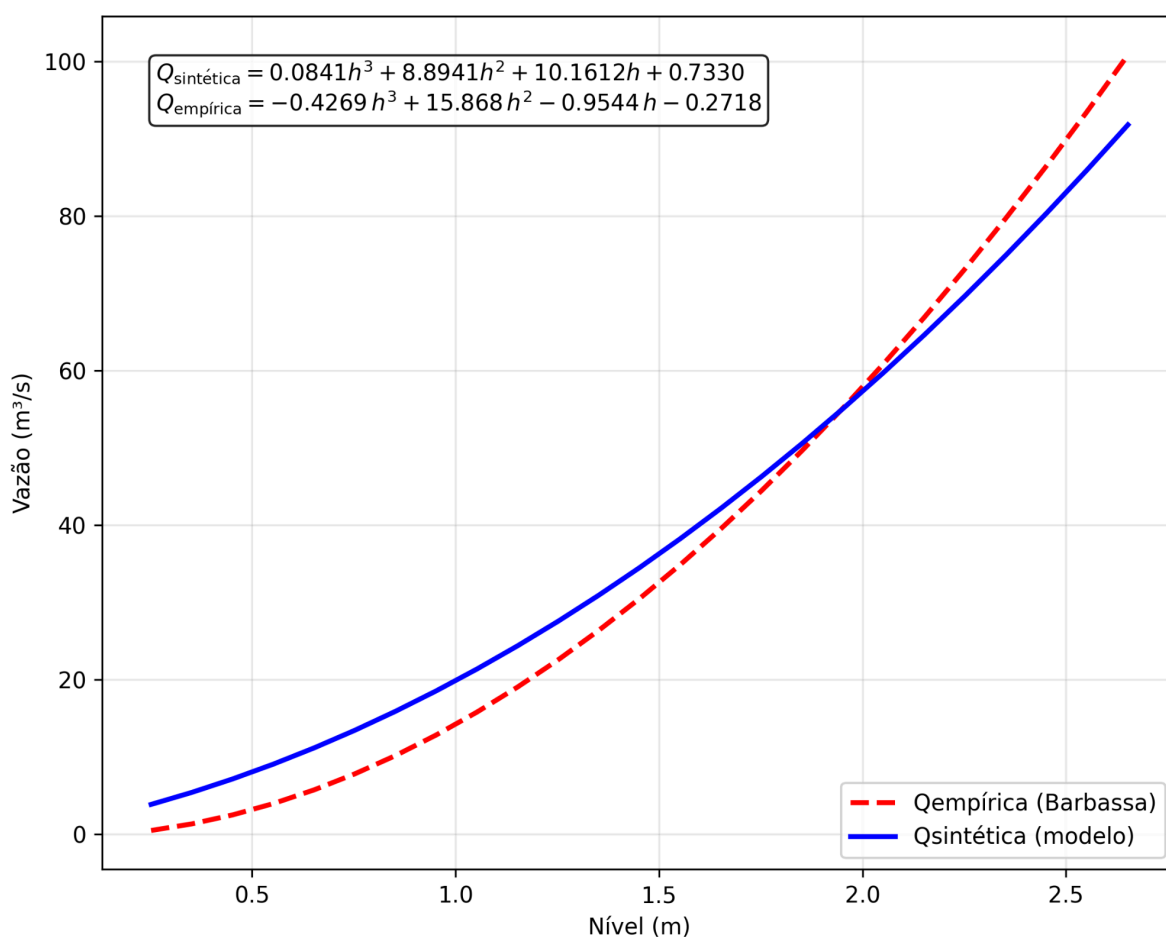
O coeficiente R^2 , ou coeficiente de determinação, calcula o quanto o modelo explica a variabilidade dos dados observados. Esse coeficiente mede a qualidade do ajuste global e a aderência da curva aos dados utilizados. Portanto, um R^2 igual a

0,9996 indica que a relação nível-vazão simulada é bem representada por um polinômio cúbico, uma vez que 99,96% da variabilidade da vazão é explicada pela relação com o nível equacionada.

4.8. COMPARAÇÃO COM A CURVA-CHAVE EMPÍRICA

Foi elaborado um gráfico comparativo entre as duas curvas-chave, expresso pela Figura 64.

Figura 64 - Comparação entre as curvas-chave empírica e sintética.



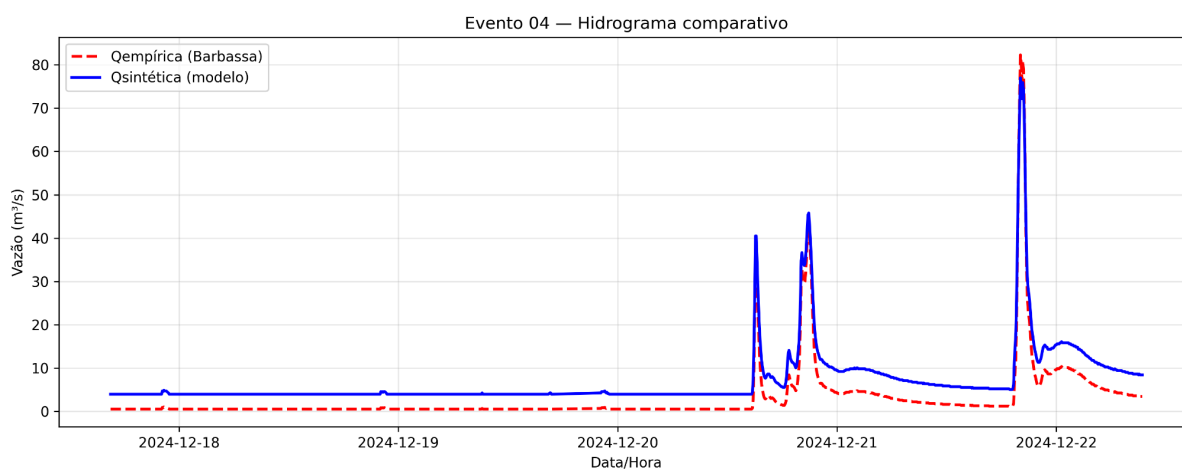
Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Percebe-se que a curva-chave sintética superestima os valores mais baixos e subestima os valores mais altos de vazão, e que o seu melhor desempenho é

quando o nível d'água está próximo de dois metros. A cota de extravasamento dessa seção é de quatro metros.

Para uma comparação visual, foi elaborado um hidrograma comparativo com base nos dados de nível d'água observados apenas para o Evento 04, ilustrado pela Figura 65. Observa-se que a curva-chave sintética superestimou as vazões mais baixas e subestimou a vazão de pico.

Figura 65 - Hidrograma comparativo para o evento Evento 04.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Por fim, para medir a qualidade do ajuste, foram calculadas as seguintes métricas: R^2 , NSE , $RMSE$ e $P - Bias$. As métricas estão expressas nas Equações (11), (9), (5) e (13), em ordem. Esses parâmetros foram calculados com base em $N = 636$ pares de dados válidos, ou seja, seiscentos e trinta e seis instantes temporais do Evento 04. A Tabela 13 resume os resultados.

Tabela 13 - Métricas de avaliação do ajuste da curva-chave sintética.

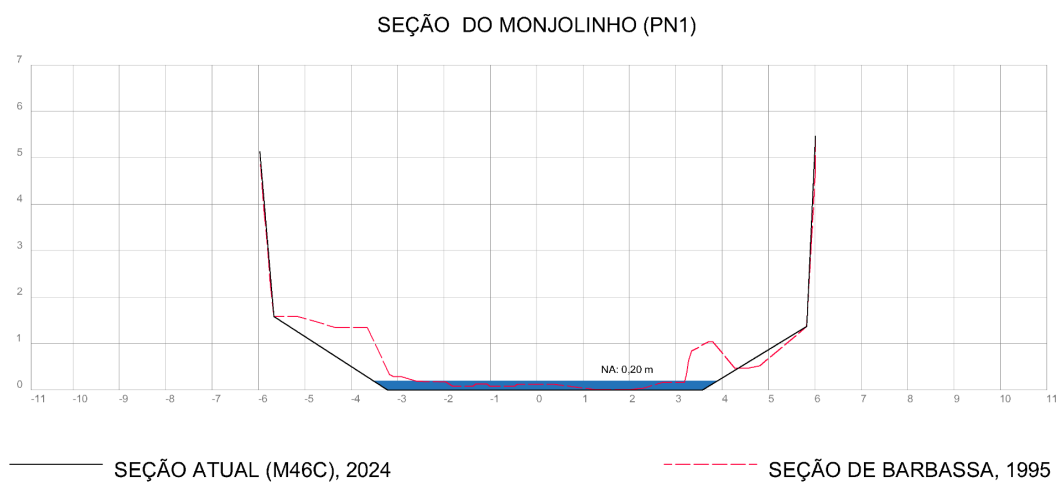
Métrica	Valor
R ²	0,8132
NSE	0,8132
RMSE	4,6664
P-BIAS	73,76%
N	636

Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Conforme informado na metodologia, considerou-se que a seção transversal do PN1 não mudou tanto ao longo do tempo, a ponto de ainda ser possível considerar a utilização da curva-chave desenvolvida para ela nos dias atuais, mesmo se tratando de um canal natural. A comparação entre a seção transversal da época das medições para a curva-chave empírica e a seção atual (nomeada como M46C no modelo do *PCSWMM*) é apresentada na Figura 66 e a foto da seção M46C, onde se situa o ponto de controle PN1, está ilustrada na Figura 67.

O levantamento de Barbassa (2024) para a seção transversal é mais detalhado e resulta em menor área molhada na base. Isso pode contribuir para o fato de vazões de baixa intensidade na curva empírica resultarem menores do que na curva teórica.

Figura 66 - Comparação das seções do ponto PN1, atual (2024) e da época do levantamento realizado por Barbassa (2024).



Fonte: adaptado de Barbassa (2024).

Figura 67 - Foto atual do ponto de controle PN1.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Portanto, com fundamento nos resultados, conclui-se que:

- 1) $N = 636$ pares de dados válidos indica que a comparação é estatisticamente robusta, uma vez que valores altos de dados válidos geram métricas mais confiáveis;
- 2) $R^2 = 0,8132$ indica que 81,32% da variabilidade das vazões calculadas pela curva-chave empírica é explicada pelas vazões calculadas pela curva-chave sintética. Ou seja, existe uma boa associação temporal entre as duas séries. Picos e recessões apresentaram um bom comportamento no hidrograma comparativo para o Evento 04;
- 3) $NSE = 0,8132$ indica um desempenho muito bom. Ou seja, o modelo é significativamente superior ao uso da média das vazões calculadas pela curva-chave empírica. A dinâmica geral do evento está bem representada. Além disso, $R^2 = NSE$, ou seja, o bom ajuste é resultado de uma boa representação da intensidade e da dinâmica do evento, não apenas da correlação dos dados;
- 4) $RMSE$ indica o erro médio em unidades físicas. Para este modelo, $RMSE = 4,67 \text{ m}^3/s$. Considerando que a vazão de pico é de, aproximadamente, $80 \text{ m}^3/s$, isso significa um erro médio de 5,8% do pico;
- 5) $P - Bias = + 73,76\%$ indica que a curva-chave sintética tende a superestimar a curva-chave empírica. Ou seja, o modelo tende a superestimar o volume de forma acumulada. Exerceu influência neste resultado a superestimação dos valores mais baixos de vazão, que também são os mais frequentes ao longo do evento.

4.9. ANÁLISE DE APLICABILIDADE DE CURVAS-CHAVE SINTÉTICAS PARA GERENCIAMENTO DE RISCO DE INUNDAÇÕES URBANAS

Apesar de as métricas específicas do modelo (Tabela 12) não terem sido altas em sua maioria, a simulação foi capaz de gerar um ajuste satisfatório da curva-chave.

Em resumo, a curva-chave sintética conseguiu representar corretamente a dinâmica geral do evento analisado pelo hidrograma (Evento 04). O erro médio (medido através do *RMSE*) é aceitável, pois corresponde a aproximadamente 6% da vazão de pico. Por outro lado, há uma tendência de superestimação de vazões, o que, conseqüentemente, resulta na superestimação acumulada de volume.

A Figura 65 é um bom exemplo do comportamento da curva-chave: as vazões menores são superestimadas, enquanto as vazões maiores são subestimadas. Entretanto, a forma do hidrograma, ou seja, seu comportamento, está bem representado.

A relevância da curva-chave se deve ao fato de que o nível d'água constitui uma variável local e pontual, enquanto a vazão é a variável responsável pela propagação do escoamento ao longo da rede de drenagem e, conseqüentemente, pela simulação do extravasamento e sua espacialização. Idealmente, a medição direta de vazão seria preferível, uma vez que eliminaria incertezas associadas ao processo de conversão. Entretanto, em canais urbanos, a medição contínua de vazão é complexa e onerosa, devido às geometrias irregulares, à presença de resíduos sólidos, às variações abruptas de regime, altas velocidades de escoamento e às dificuldades de instalação e manutenção de equipamentos. Assim, opta-se, na prática, pela medição de nível d'água, variável mais simples e economicamente viável de monitorar, sendo a curva-chave o instrumento fundamental para converter esses níveis em vazões e viabilizar a modelagem hidráulica e a previsão espacial das áreas inundáveis.

Conclui-se que a curva-chave é, sim, aplicável para o gerenciamento de risco de inundações urbanas por diversos fatores:

- 1) O R^2 indica uma boa capacidade para antecipar a dinâmica do evento. Antecipar a dinâmica do evento é fundamental: conhecer o formato correto do hidrograma é o fator mais importante para a previsão adequada de inundações urbanas;
- 2) O *NSE* indica que o modelo apresenta resultados muito melhores do que utilizar a média dos valores observados. Isto é, o modelo representa a

resposta hidrológica urbana de forma consistente, e é adequado para os eventos utilizados para o seu desenvolvimento: chuvas rápidas e intensas, típicas de eventos urbanos;

- 3) O erro médio (*RMSE*) não compromete significativamente o modelo, uma vez que representa, aproximadamente, 6% da vazão de pico do evento;
- 4) Há uma tendência de superestimação de vazões ($P - Bias \simeq 74\%$), especialmente em vazões pequenas, sem risco de extravasamento do canal. Para o gerenciamento de risco de inundações urbanas, essa superestimação não deve gerar grandes impactos, visto que a faixa de vazões para as quais isto acontece não atinge os níveis de alertas de inundações. Por outro lado, a subestimação de grandes vazões, apresentada nas Figuras 63 a 65, pode implicar na subestimação do risco de inundações ou de seus impactos potenciais. Sugere-se, portanto, que estudos futuros se dediquem a uma etapa de calibração adicional, que vise ao ajuste dessa tendência e, conseqüentemente, aumente a confiabilidade da previsão de vazões com base nas curvas-chave sintéticas para todas as faixas de valores possíveis.
 - a) A subestimação de vazões extremas pode estar relacionada com o fato de que, dentro do período de coleta de dados de chuva, não houve vazões extremas para calibrar o modelo;
 - b) Ao utilizar a informação de vazão no gerenciamento de inundações, deve-se estar ciente de que os dados de pico são subestimados;

O acúmulo de resíduos em N3 exemplifica a necessidade de manutenção nas redes de drenagem. Para a mesma altura d'água, caso tenha ou não resíduos sólidos no local, há diferentes velocidades de escoamento e, considerada a área molhada, diferentes vazões. Sendo assim, para a curva-chave e o sistema de previsão de inundações e emissão de alertas serem realmente efetivos, é imprescindível a existência de manutenção periódica e básica da rede de drenagem.

5. CONCLUSÃO

O gerenciamento de riscos de inundações urbanas é uma área cada vez mais importante para o poder público. A emergência climática, a urbanização descontrolada, a infraestrutura precária das cidades e a desigualdade social alarmante, principalmente em países subdesenvolvidos, têm aumentado a frequência e a intensidade de eventos pluviométricos e fluviométricos. Disso resultam inundações urbanas que geram perdas materiais e imateriais profundas, e, por vezes, irreversíveis (Bastos, 2009; Fava *et al.*, 2021; Morelli; Cunha, 2021; Petit-Boix *et al.*, 2015; Sofia *et al.*, 2017; Xu *et al.*, 2023).

Urge resolver esse problema nas cidades. A longo prazo, as soluções estão relacionadas à área de planejamento: Sistemas de Espaços Livres, planos diretores mais restritivos, infraestrutura verde, entre outros. A médio e curto prazo, entretanto, é imprescindível o desenvolvimento de sistemas de alertas a serem emitidos para a população, objetivando mitigar danos oriundos das inundações. Esses sistemas podem ser efetivados através de modelagem hidrodinâmica e da elaboração de curvas-chave para converter níveis d'água em vazão, e vice-versa, a depender das ferramentas de modelagem e análise a serem utilizadas (Demeritt *et al.*, 2010; Massazza *et al.*, 2019).

A modelagem e as curvas-chave constituem uma ferramenta importante para o conhecimento das vazões nos cursos d'água de interesse. A medição empírica e contínua dessas vazões ainda é complexa e cara. Esse conhecimento, todavia, é essencial para a previsão de inundações (Nogueira *et al.*, 2025).

O presente trabalho teve por fim avaliar a aplicabilidade da curva-chave sintética desenvolvida no gerenciamento de risco de inundações urbanas, considerando a curva-chave de Barbassa (2024) como a curva empírica (valores de referência). Com os resultados obtidos, pode-se concluir que:

- 1) A elaboração e a qualidade do modelo estão intrinsecamente relacionadas com a disponibilidade e a qualidade dos dados de entrada necessários;

- a) É importante existir um levantamento atualizado das seções transversais de interesse para o modelo, de forma a se aproximar da realidade;
 - i) Seria ideal a criação de um banco de dados que concentre esses levantamentos atualizados e geograficamente distribuídos;
 - b) A qualidade e a confiabilidade dos dados dos eventos (sejam os dados de nível ou de chuva) são imprescindíveis para o cálculo das métricas de qualidade;
 - i) Em geral, de eventos com poucos dados, decorrem métricas pouco confiáveis e de baixa qualidade;
 - ii) Acúmulo de lixo, formigas e outros problemas no sensor ou próximo a ele podem dificultar ou até mesmo inviabilizar o uso das informações coletadas;
 - c) Apesar das dificuldades, São Carlos é um município privilegiado: há uma ampla base de dados, em especial das seções transversais. Ademais, a existência de universidades que estudam o assunto se traduz numa gama de estudos na área e em uma curva-chave empírica que viabiliza a comparação com dados de referência;
- 2) A resolução do modelo de terreno impacta o desenvolvimento do modelo hidrodinâmico;
- a) Um modelo de terreno deve apresentar a resolução ótima para a situação desejada, e não a resolução mais alta (Muthusamy *et al.*, 2021). Resoluções exageradamente altas exigem maior poder computacional e podem dificultar ou até mesmo inviabilizar algumas etapas do desenvolvimento do modelo hidrodinâmico;
- 3) A escolha inicial dos parâmetros pode impactar o tempo de calibração;

- a) O ideal é utilizar bases de dados confiáveis e atualizadas, que refletem a situação atual da área de estudo;
- 4) A etapa de elaborar o modelo no *software QGIS*, realizada antes de inserir o modelo no *PCSWMM*, foi mais complexa e demorada do que o esperado. Entretanto, a execução criteriosa dessa etapa faz com que a importação no *PCSWMM* seja mais simples e rápida;
- a) Inserir todas as informações que seriam necessárias dentro do *QGIS* facilitou a importação do modelo para o *PCSWMM* de modelagem hidrodinâmica e otimizou o tempo que seria necessário para a etapa de modelagem hidrodinâmica;
- 5) O levantamento topográfico é essencial para a qualidade do modelo hidrodinâmico. A correção de erros dessa fase é crucial e impacta etapas subsequentes;
- a) Erros no levantamento topográfico podem gerar instabilidade no modelo hidrodinâmico, e precisam ser corrigidos antes de inserir a informação, ou de forma manual, depois, dentro do *PCSWMM*;
- 6) O *Routing Time* é um parâmetro essencial dentro do *PCSWMM*;
- a) *Routing Times* inadequados implicam erros de continuidade elevados e instabilidade numérica do modelo;
- 7) A análise de sensibilidade é uma ferramenta importante para definir quais parâmetros serão utilizados na calibração;
- 8) A calibração automática não performou da forma esperada;
- a) Esperava-se que essa etapa melhorasse significativamente o *NSE* de todos os pontos de controle, mas isso não ocorreu;
 - i) Supõe-se que esses resultados podem ser aprimorados com o aumento do número de população, de gerações e a concatenação de mais eventos. Para isso, entretanto, seria necessário elaborar estudos futuros que tenham unicamente a

calibração como foco, uma vez que essa etapa demandaria muito tempo e poder computacional para ser realizada;

- ii) Recomenda-se também, para estudos futuros, a tentativa de calibração por ponto de controle, visto que a alta complexidade do modelo pode ter impactado negativamente a calibração automática multiponto por algoritmo genético;

b) Isso fez com que uma etapa adicional, de calibração e ajuste manual, fosse necessária;

- i) A fase de calibração manual conseguiu melhorar os resultados, de forma geral, mas, como esperado, não chegou a valores de *NSE* tão elevados quanto os obtidos para os pontos de controle em que a calibração automática foi bem-sucedida;

- ii) O acúmulo de resíduos próximo ao sensor no ponto N3 impactou negativamente os resultados e demandou ajustes no modelo e nos dados observados para contornar a situação;

9) O evento 08 foi selecionado por critérios de chuva, mas não foi um evento relevante em relação ao nível d'água. Estudos futuros podem avaliar esse evento novamente para investigar o seu comportamento e relevância para este tipo de análise.

10) Apesar de os *NSEs* específicos do modelo para todos os eventos não terem sido próximos a 1, a obtenção da curva-chave a partir do modelo foi bem sucedida;

- a) A comparação entre as curvas sintética e empírica e suas métricas de qualidade indicam que o ajuste da curva-chave está satisfatório, e representa bem a dinâmica geral do evento analisado no hidrograma (Evento 04). Por outro lado, destaca-se a tendência de superestimar as vazões de baixa magnitude e subestimar as vazões de pico;

b) Logo, a curva-chave sintética obtida através do desenvolvimento deste estudo é aplicável para o gerenciamento de risco de inundações

urbanas. Essa curva constitui uma ferramenta importante para o poder público mitigar desastres socioambientais relacionados a eventos pluviométricos;

11) Com o objetivo de reduzir a distância entre a realidade prática e a produção acadêmica, foram disponibilizados o modelo calibrado (arquivo *.inp*) e validado para o Evento 04 (evento utilizado para calibração) e os dados das seções transversais da área de estudo (arquivo *CAD*) na plataforma Zenodo ([link](#));

- a) O usuário deve inserir a chuva de interesse caso queira utilizar o modelo;
- b) Eventuais modificações das seções transversais ao longo da modelagem (simplificações, ajuste para as possibilidades de representação dentro do *PCSWMM* etc.) foram realizadas diretamente no arquivo *.inp*;

12) Estudos futuros podem:

- a) Utilizar este modelo como base e explorar as etapas de calibração e pós-calibração, com o fim de aumentar a confiabilidade da previsão de vazões e diminuir o número de alarmes falsos potenciais;
- b) Explorar o uso da curva-chave obtida para outros eventos, objetivando verificar se o desempenho observado é generalizável. Por exemplo, pode-se gerar hidrogramas comparativos para outros eventos e/ou inserir outros dados de chuva e investigar a resposta do modelo;
- c) Modificar os eventos utilizados para calibrar e validar o modelo hidrodinâmico bem como elaborar e comparar manchas de inundação;
 - i) Os eventos utilizados neste estudo não geraram inundações, e, portanto, essa etapa foi descartada no desenvolvimento da pesquisa;

- ii) Recomenda-se a elaboração de estudos futuros que visem avaliar a possibilidade de utilização de curvas-chave extrapoladas para prever o nível d'água em inundações.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELRAHMAN, Y. T.; EL-MOUSTAFA, A. M. ; ELFAWY, M.. Simulating Flood Urban Drainage Networks through 1D/2D Model Analysis. **Journal of Water Management Modeling**, v. 26, 2018.

ABREU CLAUDINO, Cinthia Maria De et al. AVALIAÇÃO DE DIFERENTES MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO NA GERAÇÃO DE MAPAS DE SUSCETIBILIDADE A INUNDAÇÃO A PARTIR DO MODELO HEIGHT ABOVE THE NEAREST DRAINAGE (HAND). **Geosciences = Geociências**, v. 41, n. 1, p. 227–241, 27 maio 2022.

ACOMPANHANDO a Agenda 2030. 24 jun. 2016. Disponível em: <https://www.undp.org/pt/brazil/publications/acompanhando-agenda-2030>. Acesso em: 16 jan. 2025.

AGÊNCIA Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. **Curva Número na Base Ottocodificada (1985, 2014 e 2022)**. [S.l.], 2026. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/geonetwork/api/records/d1c36d85-a9d5-4f6a-85f7-71c2dc801a67>>. Acesso em: 24 jan. 2026.

AKHTER, M. S.; HEWA, G. A.. The Use of PCSWMM for Assessing the Impacts of Land Use Changes on Hydrological Responses and Performance of WSUD in Managing the Impacts at Myponga Catchment, South Australia. **Water**, v. 8, n. 11, p. 511–527, 2016.

ALFIERI, L. *et al.* A global network for operational flood risk reduction. **Environmental Science and Policy**, v. 84, p. 149–158, 2018.

ALMEIDA, D.; GANDRA, A.. **Mortes no Rio Grande do Sul aumentam para 151**. ICL Notícias. Disponível em:

<<https://iclnoticias.com.br/mortes-no-rio-grande-do-sul-aumentam-para-151/>>.

Acesso em: 16 maio. 2024.

AL-SABHAN, W.; MULLIGAN, M.; BLACKBURN, G. A. A real-time hydrological model for flood prediction using GIS and the WWW. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 27, n. 1, p. 9–32, 2003.

AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY (AMS). **Rain - Glossary of Meteorology**. 2012. Disponível em: <<https://glossary.ametsoc.org/wiki/Rain>>.

Acesso em: 26 out. 2025.

ÁREAS URBANIZADAS NO BRASIL 1985 - 2022. 2023. MapBiomias, 2023.

Disponível em:

https://brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2023/10/FACT_Areas-Urbanas-no-Brasil_31.10_v2.pdf. Acesso em: 17 jan. 2025.

BALASUBRAMANIAN, A. Digital elevation model (DEM) in GIS, Sep. 2017.

Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/319454004_DIGITAL_ELEVATION_MODEL_DEM_IN_GIS>. Acessado em: 19 set. 2024.

BANJARA, M. *et al.* Impact of Land Use and Land Cover Change on Hydrological Processes in Urban Watersheds: Analysis and Forecasting for Flood Risk Management. **Geosciences (Switzerland)**, v. 14, n. 2, 2024.

BARBASSA, A. P.. MONITORAMENTO PLUVIOMÉTRICO E DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM ÁREAS URBANAS. **Engenharia Urbana em Debate**, v. 5, n. 1, 24 jul. 2024.

BASTOS, P. C.. **Efeitos da urbanização sobre vazões de pico de enchente**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009. Disponível em: <<http://repositorio.ufes.br/handle/10/10218>>. Acesso em: 16 jan. 2025.

BENSO, M. R. *et al.* Efeito da resolução de modelos digitais de elevação na acurácia de modelagem hidráulica em áreas urbanas. In: ENCONTRO NACIONAL DE ÁGUAS URBANAS, 15., 2024, Recife, PE. **Anais [...]**. Recife: ABRHidro, 2024.

BRASIL DESTINOUS 33,3 MILHÕES DE TONELADAS DE LIXO DE FORMA INADEQUADA EM 2022 – ABREMA. , 18 jul. 2024. Disponível em: <<https://www.abrema.org.br/2024/07/18/brasil-destinou-333-milhoes-de-toneladas-de-lixo-de-forma-inadequada-em-2022/>>. Acesso em: 24 jan. 2025

Brasil gera cerca de 80 milhões de toneladas de resíduos por ano. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/radioagencia-nacional/meio-ambiente/audio/2023-04/brasil-gera-cerca-de-80-milhoes-de-toneladas-de-residuos-por-ano>>. Acesso em: 3 jul. 2025.

BRASIL. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS. Diagnóstico dos serviços de água e esgotos.** Brasília, 2019. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/diagnosticos-anteriores-do-snis>>. Acesso em: 15 jan. 2025.

BRASIL. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS. Diagnóstico dos serviços de água e esgotos.** Brasília, 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos-snis>>. Acesso em: 15 jan. 2025.

Brasil tem 1.942 cidades com risco de desastre ambiental | Agência Brasil. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2024-05/brasil-tem-1942-cidades-com-risco-de-desastre-ambiental>>. Acesso em: 22 jan. 2025.

BRECKENFELD, K. A. A. *et al.* Avaliação dos novos modelos digitais de elevação globais NASADEM, COPDEM e FABDEM comparativamente a dados LIDAR. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 16.; SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA, 15., 2022, Caruaru, PE. **Anais** [...]. Caruaru: ABRHidro, 2022.

BRIGHENTI, T. M. *et al.* ANÁLISE DE SENSIBILIDADE COMO PRIMEIRO PASSO PARA MODELAGEM HIDROLÓGICA: estudo de caso do modelo SWAT. In: XXII SBRH - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. **Anais**. Florianópolis -

SC: 2017. Disponível em:
<<https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/60/PAP022140.pdf>>

BROWN, J. D.; SPENCER, T.; MOELLER, I. Modeling storm surge flooding of an urban area with particular reference to modeling uncertainties: A case study of Canvey Island, United Kingdom. **Water Resources Research**, v. 43, n. 6, 2007.

BUARQUE, A. C. S. *et al.* Using historical source data to understand urban flood risk: a socio-hydrological modelling application at Gregório Creek, Brazil, **Hydrological Sciences Journal**, v. 65, n. 7, p. 1075-1083, 2020.

CAMANA, J. C. Modelos digitais de elevação: aplicações em bacias hidrográficas. Medianeira: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 23 Jun. 2016.

CEA, L.; COSTABILE, P. Flood risk in urban areas: Modelling, management and adaptation to climate change. A review. *Hydrology*, v. 9, n. 50, p. 1 - 35, 2022.

CHITWATKULSIRI, D. *et al.* Development and Application of a Real-Time Flood Forecasting System (RTFlood System) in a Tropical Urban Area: A Case Study of Ramkhamhaeng Polder, Bangkok, Thailand. **Water (Switzerland)**, v. 14, n. 10, 2022.

CHOWDHURY, M. S. Modelling hydrological factors from DEM using GIS. *MethodsX*, v. 10, n. 102062, p. 102062, 2023.

CHUNG, W. H.; ALDAMA, A. A.; SMITH, J. A. On the effects of downstream boundary conditions on diffusive flood routing. **Advances in Water Resources**, v. 16, n. 5, p. 259–275, 1993.

CLARKE, R. T.; MENDIONDO, E. M.; BRUSA, L. C. Uncertainties in mean discharges from two large South American rivers due to rating curve variability. **Hydrological Sciences Journal**, v. 45, n. 2, p. 221–236, 2000.

CORREIA, C. V. *et al.* DOENÇAS DE VEICULAÇÃO HÍDRICA E SEU GRANDE IMPACTO NO BRASIL: CONSEQUÊNCIA DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS OU INEFICIÊNCIA DE POLÍTICAS PÚBLICAS?. **Brazilian Medical Students**, São Paulo, Brasil, v. 5, n. 8, 2021. DOI: 10.53843/bms.v5i8.100. Disponível em: <https://bms.ifmsabrazil.org/index.php/bms/article/view/100>. Acesso em: 18 mar. 2025.

CORZO PEREZ, G. A. *et al.* Development of a hazard risk map for assessing pedestrian risk in urban flash floods: A case study in Cúcuta, Colombia. **River**, v. 3, n. 1, p. 8–23, 2024.

CRONEBORG, L. *et al.* Digital elevation models: A guidance note on how digital elevation models are created and used - includes key definitions, sample terms of reference, and how best to plan a DEM-mission. [s.l.] World Bank, Washington, DC, 2020.

DAVIS, S. *et al.* A Flood Forecasting Framework Coupling a High Resolution WRF Ensemble With an Urban Hydrologic Model. **Frontiers in Earth Science**, v. 10, 2022.

DE ALMEIDA, G. A. M. *et al.* Improving the stability of a simple formulation of the shallow water equations for 2-D flood modeling. **Water Resources Research**, v. 48, n. 5, 2012.

DEMERRITT, D. *et al.* Challenges in communicating and using ensembles in operational flood forecasting. **Meteorological Applications**, v. 17, n. 2, p. 209–222, 2010.

DI BALDASSARRE, G. *et al.* Flood-plain mapping: A critical discussion of deterministic and probabilistic approaches. **Hydrological Sciences Journal**, v. 55, n. 3, p. 364–376, 2010.

DI BALDASSARRE, G.; CLAPS, P. A hydraulic study on the applicability of flood rating curves. **Hydrology Research**, v. 42, n. 1, p. 10–19, 2011.

DI BALDASSARRE, G.; MONTANARI, A. Uncertainty in river discharge observations: A quantitative analysis. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 13, n. 6, p. 913–921, 2009.

Diagnósticos **SNIS**. Disponível em:
<<https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos-snis>>. Acesso em: 17 jan. 2025.

DOMENEGHETTI, A.; CASTELLARIN, A.; BRATH, A. Assessing rating-curve uncertainty and its effects on hydraulic model calibration. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 4, p. 1191–1202, 11 abr. 2012.

DOOLITTLE H.E. The Integrating Gate: A Device for Gaging in Open Channels. *In*: 1 jan. 1923.

EIRAS, C. G. S.. **Mapeamento da suscetibilidade a eventos perigosos de natureza geológica e hidrológica em São Carlos - SP**. Mestrado em Geotecnia—São Carlos: Universidade de São Paulo, 13 mar. 2018.

EMERTON, R. E. *et al.* Continental and global scale flood forecasting systems. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, v. 3, n. 3, p. 391–418, 2016.

ETTRITCH, G. *et al.* Enhancing digital elevation models for hydraulic modelling using flood frequency detection. *Remote sensing of environment*, v. 217, n. 1, p. 506–522, 2018.

FAGUNDES E SOUZA, M.. **Calibrated and validated hydrodynamic model and cross-sectional data for the Monjolinho watershed, São Carlos, SP**. Zenodo, , 6 maio 2026. Disponível em: <<https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.20057292>>. Acesso em: 6 maio. 2026.

FAVA, M. C. *et al.* Automatic Spatial Rainfall Estimation on Limited Coverage Areas. *In*: 2021 IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON METROLOGY FOR AGRICULTURE AND FORESTRY (METROAGRIFOR). **2021 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor)**. Trento-Bolzano, Italy: IEEE, 3 nov. 2021. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9628691/>>. Acesso em: 10 set. 2025

FAVA, M. C. *et al.* Improving flood forecasting using an input correction method in urban models in poorly gauged areas. **Hydrological Sciences Journal**, v. 65, n. 7, p. 1096–1111, 18 maio 2020.

FAVA, M. C.. **Improving flood forecasting using real-time data to update urban models in poorly gauged areas**. 2019. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo,

São Carlos, 2019. doi:10.11606/T.18.2019.tde-29062020-175420. Acesso em: 03 jul. 2025.

FRANCHINI, M.; GALEATI, G. Comparative analysis of some methods for deriving the expected flood reduction curve in the frequency domain. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 4, n. 1, p. 155–172, 2000.

FUENTES, I. *et al.* Comparison of Surface Water Volume Estimation Methodologies That Couple Surface Reflectance Data and Digital Terrain Models. **Water**, v. 11, n. 4, p. 780, 15 abr. 2019.

G1 SÃO CARLOS E ARARAQUARA. **Comércio de São Carlos faz “black enchente” após prejuízo com chuva estimado em R\$ 1 milhão**. Notícias. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/sao-carlos-regiao/noticia/2020/01/14/comercio-de-sao-carlos-faz-black-enchente-apos-prejuizo-com-chuva-estimado-em-r-1-milhao.ghtml>>. Acesso em: 27 abr. 2024.

GARCIA, J. I. B.; PAIVA, E. M. C. D. de. Comparação das respostas do modelo SWMM para diferentes amplitudes de cheia. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO SUL, 1.; SIMPÓSIO DE ÁGUAS DA AUGM, 1., 2004, Santa Maria, RS. **Anais** [...]. Santa Maria: ABRHidro, 2004.

GHANGHAS, A.; DEY, S.; MERWADE, V. Evaluating the reliability of synthetic rating curves for continental scale flood mapping. **Journal of Hydrology**, v. 606, 2022.

GOULARTE, E. R. P.; MARCUZZO, F. F. N.. Delimitação automática de bacias hidrográficas por SIG: procedimentos para tratamento de MDT. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 16.; SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA, 15., 2022, Caruaru, PE. **Anais** [...]. Caruaru: ABRHidro, 2022.

GUO, K.; GUAN, M.; YU, D. Urban surface water flood modelling-a comprehensive review of current models and future challenges. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 25, n. 5, p. 2843–2860, 2021.

GUTH, P. L. *et al.* Digital elevation models: Terminology and definitions. Remote

sensing, v. 13, n. 18, p. 3581, 2021.

HEC-HMS Technical Reference Manual. **Calibration Summary Statistics**. HEC. 2015. Disponível em: <<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm/calibration/calibration-summary-statistics>>. Acesso em: 29 out. 2025.

HERNANDEZ, L. C.; SZIGETHY, L.. **Controle de Enchentes: exemplos do uso da tecnologia e inovação para o controle de enchentes**. Site do governo federal. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/231-controle-de-enchentes#:~:text=Enchentes%20em%20áreas%20urbanas,%2C%20praças%2C%20ruas%2C%20etc>>. Acesso em: 27 abr. 2024.

HUBBARD, K. G. Spatial variability of daily weather variables in the high plains of the USA. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 68, n. 1–2, p. 29–41, mar. 1994.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Bacias e Divisões Hidrográficas do Brasil | 2021**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/31653-bacias-e-divisoes-hidrograficas-do-brasil.html>. Acesso em: 10 nov. 2024.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA . **Censo Brasileiro de 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

JAMALI, B. *et al.* A rapid urban flood inundation and damage assessment model. **Journal of Hydrology**, v. 564, p. 1085–1098, 2018.

JEONG, C. *et al.* Selection of elevation models for flood inundation map generation in small urban stream: Case study of Anyang stream. *Advances in technology innovation*, v. 9, n. 1, p. 28–41, 2023.

KIANG, J. E. *et al.* A Comparison of Methods for Streamflow Uncertainty Estimation. **Water Resources Research**, v. 54, n. 10, p. 7149–7176, 2018.

KNIGHT, K. L. *et al.* Assessing the use of dual-drainage modeling to determine the effects of green stormwater infrastructure on roadway flooding and traffic performance. **Water (Switzerland)**, v. 13, n. 11, 2021.

KUMAR, P. *et al.* Towards an operationalisation of nature-based solutions for natural hazards. **Science of the Total Environment**, v. 731, 2020.

LIMA, A. *Análise de impactos associados à precipitação na cidade de São Carlos/SP*. 2012. Dissertação (Mestrado em Geografia) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, São Carlos, 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/96675>>. Acesso em: 15 jan. 2025.

LIMA, F. N.; FERNANDES, W.; NASCIMENTO, N.. Joint calibration of a hydrological model and rating curve parameters for simulation of flash flood in urban areas. **RBRH**, v. 24, p. e24, 2019.

LIMA, M. C. P. B. de ; SCHENK, L. B. M.. Estudo de infraestrutura verde na bacia hidrográfica do córrego do Monjolinho, São Carlos, SP. **Revista LABVERDE**, v. 9, n. 1, p. 50–72, mar. 2018.

LINSLEY, R. K.. Extending the forecasts of temperature for the prediction of stream-flow from snow-melt. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 22, n. 3, p. 722–726, ago. 1941.

LIWANAG, F. *et al.* Flood modeling using GIS and PCSWMM. **Engineering Journal**, v. 22, n. 3, p. 279–289, 2018.

LU, W.; QIN, X. S.; JUN, C. A parsimonious framework of evaluating WSUD features in urban flood mitigation. **Journal of Environmental Informatics**, v. 33, n. 1, p. 17–27, 2019.

MA, C. *et al.* Improved urban flood risk assessment based on spontaneous-triggered risk assessment conceptual model considering road environment. **Journal of Hydrology**, v. 608, 2022.

MAIS de 90% dos brasileiros contam com serviço de coleta de lixo. Disponível em:

<<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2024-02/mais-de-90-dos-brasileiros-ontam-com-servico-de-coleta-de-lixo>>. Acesso em: 21 jan. 2025.

MALDONADO, L. H.; GAMARO, P. E. M.. MÉTODOS DE CORREÇÃO DE VAZÕES EM TRAMOS SUPERIORES DE CURVAS-CHAVES E PARA O CASO DE HISTERESE. In: XX SBRH - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. **Anais**. Bento Gonçalves - RS: 2013. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/66/SBRH2013__PAP012822.pdf>

MANSANAREZ, V. *et al.* Shift Happens! Adjusting Stage-Discharge Rating Curves to Morphological Changes at Known Times. **Water Resources Research**, v. 55, n. 4, p. 2876–2899, 2019.

MASSAZZA, G. *et al.* Flood Hazard Scenarios of the Sirba River (Niger): Evaluation of the Hazard Thresholds and Flooding Areas. **Water**, v. 11, n. 5, p. 1018, 15 maio 2019.

MEHRI, M. *et al.* Block-scale use of bioretention cells to restore the urban water balance: A case study in Tehran metropolis. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 51, p. 101621, fev. 2024.

MERZ, B. *et al.* Floods and climate: Emerging perspectives for flood risk assessment and management. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 14, n. 7, p. 1921–1942, 2014.

MERZ, B. *et al.* Charting unknown waters - On the role of surprise in flood risk assessment and management. **Water Resources Research**, v. 51, n. 8, p. 6399–6416, 2015.

MET OFFICE. **Fact sheet no. 3: water in atmosphere**. National Meteorological Library and Archive. Setembro de 2007. 13 p. Disponível em: <<https://www.metoffice.gov.uk/research/library-and-archive/publications/>>. Acesso em: 26 out. 2025.

MOGES, D. M. *et al.* How does the choice of DEMs affect catchment hydrological modeling? *The Science of the total environment*, v. 892, n. 164627, p. 1 - 15, 2023.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological processes*, v. 5, n. 1, p. 3–30, 1991.

MORELLI, A. B.; CUNHA, A. L.. Measuring urban road network vulnerability to extreme events: An application for urban floods. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 93, p. 102770, abr. 2021.

MUNIR, B. A.; AHMAD, S. R.; HAFEEZ, S. Integrated hazard modeling for simulating torrential stream response to flash flood events. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 9, n. 1, 2019.

MUSTAFA, A. *et al.* GIS-based hydrodynamic modeling for urban flood mitigation in fast-growing regions: a case study of Erbil, Kurdistan Region of Iraq. *Scientific reports*, v. 13, n. 1, p. 8935, 2023.

MUTHUSAMY, M. *et al.* Understanding the effects of Digital Elevation Model resolution in urban fluvial flood modelling. **Journal of Hydrology**, v. 596, p. 126088, maio 2021.

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

NEPPEL, L. *et al.* Flood frequency analysis using historical data: Accounting for random and systematic errors. **Hydrological Sciences Journal**, v. 55, n. 2, p. 192–208, 2010.

NIAZI, Mehran *et al.* Storm Water Management Model: Performance Review and Gap Analysis. **Journal of Sustainable Water in the Built Environment**, v. 3, n. 2, p. 04017002, maio 2017.

NOGUEIRA, C. D. *et al.* ANÁLISE DO IMPACTO DE VAZÕES MAIS ELEVADAS NA CALIBRAÇÃO DE CURVA-CHAVE UTILIZANDO MÉTODO BAYESIANO. *In: XXVI SBRH - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. Anais*. Vitória - ES: 2025. Disponível em: <<https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=18156>>

OCIO, D. *et al.* The role of rating curve uncertainty in real-time flood forecasting. **Water Resources Research**, v. 53, n. 5, p. 4197–4213, 2017.

OGUNBODE, C. A. *et al.* Attribution matters: Revisiting the link between extreme weather experience and climate change mitigation responses. **Global Environmental Change**, v. 54, p. 31–39, 2019.

Painel de Saneamento. Instituto Trata Brasil, 2024. Disponível em: <<https://tratabrasil.org.br/painel-saneamento-brasil/>>. Acesso em: 16 jan. 2025.

PAN, F.; WANG, C.; XI, X. Constructing river stage-discharge rating curves using remotely sensed river cross-sectional inundation areas and river bathymetry. **Journal of Hydrology**, v. 540, p. 670–687, 2016.

PAPPENBERGER, F. *et al.* The monetary benefit of early flood warnings in Europe. **Environmental Science and Policy**, v. 51, p. 278–291, 2015.

PETIT-BOIX, Anna *et al.* Environmental and economic assessment of a pilot stormwater infiltration system for flood prevention in Brazil. **Ecological Engineering**, v. 84, p. 194–201, nov. 2015.

PINOS, J.; TIMBE, L. Performance assessment of two-dimensional hydraulic models for generation of flood inundation maps in mountain river basins. **Water Science and Engineering**, v. 12, n. 1, p. 11–18, 2019.

PIRONE, D.; PADULANO, R.; DEL GIUDICE, G.. Approaching Urban Flood Modelling According to Available Data: A State-of-the-Art Review and Future Challenges. **Journal of Flood Risk Management**, v. 19, n. 1, p. e70184, mar. 2026.

Prejuízos causados pelas chuvas no Brasil entre 2017 e 2022 ultrapassam R\$ 55,5 bilhões, revela CNM. Disponível em: <<https://www.cnm.org.br/comunicacao/noticias/prejuizos-causados-pelas-chuvas-no-brasil-entre-2017-e-2022-ultrapassam-r-55-5-bilhoes-revela-cnm>>. Acesso em: 27 abr. 2024.

RAMPINELLI, C. G.; KNACK, I.; SMITH, T. Flood mapping uncertainty from a restoration perspective: A practical case study. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 7, 2020.

RANGEL, R. Ipea - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/portal/categorias/45-todas-as-noticias/noticias/13242-estudo-traca-trajetoria-e-condicoes-para-drenagem-e-manejo-sustentavel-de-aguas-pluviais>>. Acesso em: 16 jan. 2025.

RIBEIRO, H. J.; FERREIRA, N. C. Análise comparativa de redes hidrológicas geradas a partir de superfícies hidrológicamente consistentes. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 20, n. 4, p. 784–805, 2014.

RODRIGUES, E. A. M.; FARIAS, M. de O.; CIRILO, J. A. Avaliação da influência da resolução do modelo digital do terreno sobre a geração da rede de drenagem em uma bacia hidrográfica. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 15., 2020, Caruaru, PE. **Anais** [...]. Caruaru: ABRHidro, 2020.

ROMERO, G. B.. **Dinâmica ecohidrológica de rios urbanos no contexto de gestão de riscos de desastres**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. doi:<https://doi.org/10.11606/D.18.2017.tde-13042017-160250>. Acesso em: 05 mai. 2026.

ROSSMAN, L. A. Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1. EPA, 2015. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-02/documents/epaswmm5_1_manual_master_8-2-15.pdf>. Acesso em: 15 set. 2025.

ROSSMAN, L. A.; SIMON, M. A.. Storm Water Management Model User's Manual Version 5.2. EPA, 2022. Disponível em: <<https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-04/swmm-users-manual-version-5.2.pdf>>. Acesso em: 12 jan. 2026.

RUEZZENE, C. B. *et al.* Revisão bibliográfica dos principais métodos de preenchimento de falhas em dados de precipitação / Bibliographic review of the main methods of filling in precipitation data. **Brazilian Journal of Business**, v. 2, n. 3, p. 2057–2071, 17 jul. 2020.

SANDS R.J.; CHANG C.C.; MCDONALD J.M. Storm water management study after flooding of the South Bronx, NYC, New York. *In*: 8 set. 2002.

Saneamento. Disponível em: <<https://painel.tce.sp.gov.br/pentaho/api/repos/%3Apublic%3ASaneamento%3Asaneamento.wcdf/generatedContent?userid=anony&password=zero>>. Acesso em: 16 jan. 2025.

SHEPARD, Donald. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *In*: THE 1968 23RD ACM NATIONAL CONFERENCE. **Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference on** -. Not Known: ACM Press, 1968. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=800186.810616>>. Acesso em: 12 set. 2025

SIDEK, L. M. *et al.* Application of pcswm for the 1-d and 1-d–2-d modeling of urban flooding in damansara catchment, malaysia. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, n. 19, 2021.

SIKORSKA, A. E.; RENARD, B. Calibrating a hydrological model in stage space to account for rating curve uncertainties: general framework and key challenges. **Advances in Water Resources**, v. 105, p. 51–66, 2017.

SILVEIRA, R. M. P.; SILVEIRA, C. T. da. ANÁLISE DIGITAL DO RELEVO APLICADA À CARTOGRAFIA GEOMORFOLÓGICA DA PORÇÃO CENTRAL DA SERRA DO MAR PARANAENSE. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 4, 15 dez. 2016.

SIVAPRAGASAM, C.; MUTTIL, N. Discharge rating curve extension - A new approach. **Water Resources Management**, v. 19, n. 5, p. 505–520, 2005.

SOFIA, G. *et al.* Flood dynamics in urbanised landscapes: 100 years of climate and humans' interaction. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 40527, 12 jan. 2017.

SOUZA, M. F. *et al.* DESAFIOS NA DELIMITAÇÃO DE SUB-BACIAS PARA MODELAGEM HIDROLÓGICA. *In: XXVI SBRH - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. Anais.* Vitória - ES: 2025. Disponível em: <<https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=17587>>

STEINBAKK, G. H. *et al.* Propagation of rating curve uncertainty in design flood estimation. **Water Resources Research**, v. 52, n. 9, p. 6897–6915, 2016.

SWMM - Computational Methods - Flow Routing, 2017. Disponível em: <<https://tbn2net.com/help/SOLIDOSen/SwmmComputationalFlowrouting.html>>. Acesso em: 06 mai. 2026.

TARBOTON, D. Terrain Analysis Using Digital Elevation Models in Hydrology. *In: INTERNATIONAL USERS CONFERENCE, 23., 2003, San Diego, CA. Anais [...].* San Diego: ESRI, 2005.

ULLAH, K.; ZHANG, J. GIS-based flood hazard mapping using relative frequency ratio method: A case study of panjkora river basin, eastern Hindu Kush, Pakistan. **PLoS ONE**, v. 15, n. 3, 2020.

UNIVERSALIZAÇÃO do Saneamento. 30 abr. 2024. Disponível em: <https://abconsindcon.com.br/universalizacao-do-saneamento/>. Acesso em: 22 jan. 2025.

VIEIRA, L. M. D. S. *et al.* Assessing the effects of rating curve uncertainty in flood frequency analysis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 27, 2022.

WARDHANI, N. W. S. *et al.* Cross-validation Metrics for Evaluating Classification Performance on Imbalanced Data. *In: 2019 INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER, CONTROL, INFORMATICS AND ITS APPLICATIONS (IC3INA). 2019 International Conference on Computer, Control, Informatics and its Applications (IC3INA).* Tangerang, Indonesia: IEEE, out. 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8949568/>>. Acesso em: 3 jul. 2025.

WECHSLER, S. P. Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review. *Hydrology and earth system sciences*, v. 11, n. 4, p.

1481–1500, 2007.

WESTERBERG, I. K. *et al.* Uncertainty in hydrological signatures for gauged and ungauged catchments. **Water Resources Research**, v. 52, n. 3, p. 1847–1865, 2016.

WILLIAM, J.. A little intro to and story of SWMM. CHI Water, 1996. Disponível em: <https://www.chiwater.com/Company/Staff/WJamesWebpage/original/homepage/Teaching/KeyModels/swmmHistory.html>. Acesso em: 9 fev. 2026.

WU, X. *et al.* Impact of climate change on human infectious diseases: Empirical evidence and human adaptation. **Environment International**, v. 86, p. 14–23, 2016.

XU, H. *et al.* Staged optimization of urban drainage systems considering climate change and hydrological model uncertainty. **Journal of Hydrology**, v. 587, 2020.

XU, K. *et al.* Rapid Prediction Model for Urban Floods Based on a Light Gradient Boosting Machine Approach and Hydrological–Hydraulic Model. **International Journal of Disaster Risk Science**, v. 14, n. 1, p. 79–97, 2023.

YANG, Q. Q. *et al.* Diagnostic analysis of waterlogging in Zhenjiang City by using PCSWMM. *In*: WENG C.-H. (org.). IOP CONFERENCE SERIES: EARTH AND ENVIRONMENTAL SCIENCE. **IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.** Institute of Physics Publishing, 2019. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85077797101&doi=10.1088%2f1755-1315%2f344%2f1%2f012139&partnerID=40&md5=34bafb5f57bc9a203ed49c380bdec8d4>>

YAZDI, M. N. *et al.* An evaluation of HSPF and SWMM for simulating streamflow regimes in an urban watershed. **Environmental Modelling & Software**, v. 118, p. 211–225, ago. 2019.

ZANCHETTA, A. D. L.; COULIBALY, P. Hybrid Surrogate Model for Timely Prediction of Flash Flood Inundation Maps Caused by Rapid River Overflow. **Forecasting**, v. 4, n. 1, p. 126–148, 2022.

7. APÊNDICES

7.1. APÊNDICE 01 - TABELA RESUMO DA REVISÃO SISTEMÁTICA 01

Protocolo	Autores	Materiais e métodos	Estudo de caso	Vantagens/Resultados importantes	Desvantagens, limitações e/ou desafios	Adequado para a pesquisa?	Por quê?
1	Alfieri <i>et al.</i> (2018)	Previsões de clima extremo, sistemas de alertas de inundações adiantados, análise de cenários, modelagem hidrológica, estimativas de vazões e mapas de inundações baseados em satélites, e análise de resposta de usuários e de emergência.	Enchentes em agosto de 2017, Austrália.	Análise de impacto de uma rede global de previsão de inundações (GFP). O sucesso da GFP deriva de ela fazer parte de um fórum global que tem a oportunidade de testar e aprimorar ferramentas de pesquisa em situações reais.	É um projeto voluntário e sem fundos. Por isso, as principais atividades da GFP devem estar ligadas aos objetivos dos grupos de pesquisa de cada participante.	Sim.	Apesar de não focar no uso de <i>PCSWMM</i> , o artigo aborda uma iniciativa global de previsão de risco de inundações e generaliza os passos necessários para a criação de um sistema de alertas adiantado.
1	Jamali <i>et al.</i> (2018)	Formulação de estrutura de modelo RUFIDAM, com quatro módulos principais: (1) geração IZs; (2) modelo de rede de drenagem, através do <i>software MOUSE</i> ou <i>SWMM</i> ; (3) modelo de inundação rápida; (4) bloco de avaliação de prejuízos.	Melbourne, Austrália.	Comparação entre simulação de redes de drenagem 1D ou 1D-2D.	Potencial de melhorar o RUFIDAM através de modelagem 2D. A previsão de custo foi boa em áreas residenciais ou de estradas, mas não em comércios e indústrias, pois o prejuízo depende do nível d'água.	Parcialmente.	Aborda o uso de <i>softwares</i> para previsão de enchentes, inclusive o <i>SWMM</i> , no qual o <i>PCSWMM</i> se baseia.
1	Al-Sabhan, Mulligan, Blackburn (2003)	Revisão de modelos hidrológicos espaciais. Desenvolvimento de sistemas de modelagem hidrológica baseados em SIG e em WWW.	---	Previsão de necessidades de modelos hidrológicos do futuro.	---	Parcialmente.	Dá um indicativo das evoluções tecnológicas dos últimos 20 anos e apresenta características essenciais a qualquer <i>software</i> de

Protocolo	Autores	Materiais e métodos	Estudo de caso	Vantagens/Resultados importantes	Desvantagens, limitações e/ou desafios	Adequado para a pesquisa?	Por quê?
							modelagem hidrológica.
1	Ogunbode <i>et al.</i> (2019)	---	---	---	---	Não.	Foca no teste de cinco hipóteses que associam eventos climáticos extremos e a mudança climática.
1	Demeritt <i>et al.</i> (2010)	Uso de modelagem em outros <i>softwares</i> , inclusive o <i>SWMM</i> , no qual o <i>PCSWMM</i> se baseia.	Reino Unido.	Análise do uso de sistemas de previsão de conjunto (EPS) em previsão operacional de enchentes.	Os autores enfatizam que o efeito de falsos alarmes faz com que haja a tendência de evitar alertas adiantados.	Parcialmente.	Dá um indicativo das evoluções tecnológicas dos últimos 10 anos e contém entrevistas com profissionais da área.
1	Merz <i>et al.</i> (2015)	Categorização e análise de fatores que podem gerar surpresa, criando um gráfico que relaciona os dois potenciais para surpresa, e proposição de formas de minimizar esses fatores.	---	As fontes de surpresa em avaliação e gerenciamento de risco de inundações são falta de previsibilidade e viés de conhecimento.	---	Parcialmente.	Estuda o fator "surpresa" no gerenciamento de riscos de enchentes.

Protocolo	Autores	Materiais e métodos	Estudo de caso	Vantagens/Resultados importantes	Desvantagens, limitações e/ou desafios	Adequado para a pesquisa?	Por quê?
1	Emerton et al. (2016)	Análise comparativa dos sistemas de previsão de enchentes continentais e globais: Europa (EFAS e E-HYPE), Austrália (HyFS), EUA (HEFS), GloFAS e GLOFFIS. Identificação dos grandes desafios na previsão de enchentes em escala global.	---	Identificação dos desafios para um sistema de previsão de enchentes em escala global e das tendências futuras para esse sistema.	A análise não incluiu mais países ao Brasil: África, Ásia e a América do Sul ou Central.	Sim.	Aborda a evolução dos sistemas de previsão de enchentes em diferentes partes do mundo.
1	Baldassarre et al. (2010)	Uso de imagens de satélite LiDAR DTM. Mapeamento determinístico de planícies de inundação. Aplicação do método GLUE. 8100 simulações, usando 81 coeficientes de Manning para 100 valores aleatórios de vazão.	Rio Dee, Reino Unido.	Mapa de planícies de inundação. Comparação entre método determinístico e probabilístico e ênfase na importância da calibração dos dados.	Não considera a incerteza na chuva com tempo de retorno de 100 anos. Abordagens determinísticas avançadas precisam de implementação de modelos numéricos com configurações complexas.	Sim.	Discorre sobre um método para geração de mapas de inundação.
1	Merz et al. (2014)	Análise de relações entre clima e inundações para o melhor gerenciamento de risco de inundações, de modo global.	---	O estudo aponta a necessidade de iniciativas globais e de enquadramento mais amplo.	---	Sim.	Vincula o clima e as inundações e discorre sobre novas perspectivas para o gerenciamento e a avaliação de risco de enchentes.

Protocolo	Autores	Materiais e métodos	Estudo de caso	Vantagens/Resultados importantes	Desvantagens, limitações e/ou desafios	Adequado para a pesquisa?	Por quê?
1	Ullah, Zhang (2020)	Realização de inventário de mapeamento de enchentes, a partir do qual identificaram-se os fatores que causaram e desencadearam as inundações. Criou-se um modelo de taxa de frequência relativa, com o modelo <i>RFR</i> . Uso de Sistemas de Informação Geográficas (SIG),	Hindu Kush Khyber, Paquistão.	Há 8 fatores que desencadeiam enchentes: elevação, declividade, densidade de drenagem, uso e cobertura do solo, curvatura, índice de vegetação por diferença normalizada, índice de umidade topográfica e evento pluviométrico.	---	Sim.	Apresenta um método alternativo de mapeamento de risco de enchentes.
1	Wu <i>et al.</i> (2016)	---	---	---	---	Não, mas aborda um aspecto importante.	O artigo não se relaciona à pesquisa, mas levanta um fato importante: mudanças climáticas e enchentes impactam diretamente na saúde pública.
1	Almeida <i>et al.</i> (2012)	Uso de equações 1D de Saint-Vernan para o <i>framework</i> matemático, do modelo 2D proposto por Bates <i>et al.</i> (2010) e de esquemas numéricos <i>q-Upwind</i> e <i>q-centered</i> . Realização de testes no modelo.	Área altamente urbanizada de Londres, Reino Unido.	Teste do modelo em cenários práticos. Melhorias na estabilidade do modelo.	---	Parcialmente.	Aborda um cenário específico.

Protocolo	Autores	Materiais e métodos	Estudo de caso	Vantagens/Resultados importantes	Desvantagens, limitações e/ou desafios	Adequado para a pesquisa?	Por quê?
1	Brown, Spencer, Moeller (2007)	Uso de modelos 1D e 2D para a modelagem hidrodinâmica (<i>Delft-FLS</i>). Definição das condições de contorno do fluxo, uso de imagens de satélite para gerar o MDE.	Ilha Canvey, Reino Unido.	Considera incertezas no modelo do terreno, no atrito inferior, em falhas do sistema de defesa contra inundações e em dados que foram inseridos manualmente a partir do modelo de tempestades.	Não considerou infiltração e não modelou roteamento de inundações em canais de drenagem com menos de 2m de largura. Também foram ignoradas as ondas de vento.	Sim.	Dá um indicativo das evoluções tecnológicas dos últimos 20 anos.
1	Pappenberger <i>et al.</i> (2015)	Análise de dados de previsão e de prejuízos causados por enchentes. Cálculo de prejuízos por enchentes que poderiam ter sido evitados.	Europa.	Entre os benefícios de um sistema de alertas adiantado, está a diminuição dos prejuízos monetários com as enchentes.	---	Parcialmente.	Aborda os benefícios de um sistema de alertas adiantado, mas a aplicação é na Europa, que tem condições muito diferentes do Brasil.
1	Kumar <i>et al.</i> (2020)	Revisão sistemática de literatura, seguindo o PRISMA, sobre riscos hidrometeorológicos (HMH) e danos na Europa, nas bases de dados: <i>Scopus</i> , <i>Web Of Science</i> e <i>ScienceDirect</i> .	---	Identificaram-se as tendências de HMH e quais foram os prejuízos (em vidas humanas e prejuízos econômicos) na Europa. Apresentam-se soluções, além de políticas para a operacionalização de soluções baseadas na natureza (NBS).	---	Parcialmente.	Aborda outros problemas para além das enchentes.

Protocolo	Autores	Materiais e métodos	Estudo de caso	Vantagens/Resultados importantes	Desvantagens, limitações e/ou desafios	Adequado para a pesquisa?	Por quê?
1	Guo, Guan, Yu (2021)	Revisão de quatro grupos de modelos nas pesquisas atuais: (1) de rede de drenagem; (2) baseado em águas rasas; (3) hidrogeomorfológico; e (4) outros métodos para selecionar todos os documentos baseados em uma metodologia de pesquisa estabelecida.	---	Levantamento dos métodos das equações dos modelos mais utilizados, vantagens e limitações de cada tipo de modelo, e em quais casos cada modelo pode ser melhor aplicado. Por fim, o estudo também apresenta os desafios futuros.	---	Sim.	Realiza uma revisão sistemática sobre modelagens hidrodinâmicas nas pesquisas atuais.
2	Vieira <i>et al.</i> (2022)	Uso do paradigma Bayesiano e o método de valores extremos generalizados (GEV). Além disso, para estimar a curva-chave, utilizou-se o <i>framework</i> BaRatin. Para FFA, utilizou-se a Teoria de Valor Extremo (EVT) assintótica. Simulação hidráulica 1D.	Rio Cuiabá, Brasil.	Obtenção das incertezas de curva-chave e avaliação de seus efeitos na análise de inundações.	O método possui algumas limitações, como avaliações residuais que incluem incertezas, consideração de autocorrelação nos resíduos, maior nível de conhecimento da área de estudo e sobre medidas hidrométricas, entre outros.	Sim.	Aborda incertezas em curvas-chave e seu impacto na análise de frequências de inundações.

Protocolo	Autores	Materiais e métodos	Estudo de caso	Vantagens/Resultados importantes	Desvantagens, limitações e/ou desafios	Adequado para a pesquisa?	Por quê?
2	Franchini, Galeati (2000)	Utilização de três modelos: (1) empírico (NERC); (2) geomorfoclimático (Fiorentino <i>et al.</i> , 1987); (3) estocástico (Bacchi <i>et al.</i> , 1992).	12 seções de rios no centro da Itália.	Comparação dos resultados dos diferentes modelos e observações sobre sua aplicabilidade.	Os valores de tempo de atraso estimados não devem ser interpretados como estimativas base de “tempo de atraso” (definição padrão), mas como um “tempo de referência” mais geral, característico da bacia, considerando-se a análise da curva de redução	Sim.	Aborda a incerteza de curvas-chave e trata de um modelo empírico.
2	Pan, Wang, Xi (2016)	Uso de modelos digitais de elevação, de batimetria e de imagens de satélite para modelagem hidrodinâmica. Esse processo foi realizado para a parte mais alta e a mais baixa do rio.	Trecho do rio Illinois entre duas estações de medição, EUA.	O método não necessita de medições de campo de vazão ou nível d'água.	Apenas foram construídas curvas SDR para o fluxo abaixo da margem cheia.	Parcialmente.	Aborda a construção de curvas-chaves, as incertezas associadas aos dados, mas se utiliza de métodos de obtenção de dados que talvez não estejam disponíveis para a presente pesquisa.
2	Ghanghas, Dey, Merwade (2022)	Uso de dados de 6189 estações de medição dos EUA, selecionadas por terem curvas-chave conhecidas e disponíveis. Estudo da acurácia de curvas SRC, em relação às curvas das estações de medição, utilizando-se	EUA.	O modelo de rede neural tem grande potencial para aprender as complexas relações entre a performance das curvas SCR e as características da bacia e dos corpos d'água.	A análise de redes neurais precisa ser repetida diversas vezes. Utiliza muitas tecnologias e dados que, provavelmente, não estão disponíveis para a presente pesquisa.	Sim.	Aborda construção e incertezas de curvas-chave, compara curvas teóricas e empíricas.

Protocolo	Autores	Materiais e métodos	Estudo de caso	Vantagens/Resultados importantes	Desvantagens, limitações e/ou desafios	Adequado para a pesquisa?	Por quê?
		um modelo de rede neural profunda.					
2	Neppel <i>et al.</i> (2010)	Modelagem hidráulica de um trecho de aproximadamente 2 km de comprimento. Uso das equações de Barré de Saint-Venant. Uso do <i>software RUBARBE</i> . Construção das curvas-chave para os modelos recentes e históricos.	10 localizações mediterrâneas: duas no rio Hérault, quatro no rio Aude e quatro na bacia de Gard.	Modelos históricos e recentes, análise de sensibilidade. Nota-se que a distribuição de valores de vazão muda e claramente quando se leva em consideração a série histórica.	Informações mais escassas para os dados mais antigos, o que pode agravar as incertezas em alguns casos.	Sim.	Aborda o impacto de dados da série histórica e enfatiza a necessidade de medições de qualidade para geração de melhores modelos.
2	Chung, Aldama, Smith (1993)	---	---	---	---	Não.	Aborda incertezas, mas foca no fluxo a jusante, no roteamento difuso de inundações e no remanso.
3	Kiang <i>et al.</i> (2018)	Método de comparação de experimentos durante dois workshops que reuniram grupos de pesquisa que desenvolveram seus próprios métodos. Análise de incertezas e uso de sete métodos de estimativa de incertezas.	França, Nova Zelândia e Reino Unido.	Comparação entre sete métodos de estimativa de incertezas. Análise de como as suposições de um método podem influenciar a largura de intervalos de incerteza.	Limitações na comparação de incertezas: a padronização entre os métodos significou que alguns deles não foram completamente explorados, é difícil isolar as diferenças devido a aspectos metodológicos etc.	Sim.	Aborda a incerteza na elaboração de curvas-chave.

Protocolo	Autores	Materiais e métodos	Estudo de caso	Vantagens/Resultados importantes	Desvantagens, limitações e/ou desafios	Adequado para a pesquisa?	Por quê?
3	Baldassarre, Claps (2011)	Extrapolação de erros de curvas-chave estáveis através de experimentos numéricos.	Rio Itália.	Pó, Boa estratégia operacional: usar curvas-chave para calibrar modelos hidráulicos e usar esse modelo para extrapolar a curva.	A análise de incertezas é complexa e pode não ser viável economicamente.	Sim.	Aborda a incerteza na elaboração de curvas-chave.
3	Sikorska, Renard (2017)	Elaboração de modelo hidrológico baseado no modelo de precipitação-escoamento e análise dos erros. Aplicação do modelo Bayesiano para estimar parâmetros desconhecidos.	Rio Ardèche, França.	Modelo precipitação-escoamento, modelo hidrológico, atualização da curva-chave, análise de incertezas que podem ser previstas.	Dificuldade de identificar autocorrelações, problemas com os bancos de dados de medição, falta de componentes sistêmicos.	Sim.	Aborda a incerteza na elaboração de curvas-chave.
3	Massazza et al. (2019)	Criação de modelo hidráulico e determinação de condições limites, de forma a criar um índice estatístico, calibrar o modelo e criar curvas-chave.	Rio Sirba, Nigéria.	Fixação dos limites de desastres para diferentes cenários, avaliação das curvas-chaves da estação hidrométrica, obtenção do tempo de propagação de inundações.	Avanços futuros se referem à implementação de alertas rápidos e à integração dos resultados do modelo hidrológico ao aumento do tempo disponível para alertar os cidadãos.	Sim.	Aborda a incerteza na elaboração de curvas-chave e indica o uso desse estudo para elaborar alertas mais eficientes.

Protocolo	Autores	Materiais e métodos	Estudo de caso	Vantagens/Resultados importantes	Desvantagens, limitações e/ou desafios	Adequado para a pesquisa?	Por quê?
3	Rampinelli, Knack, Smith (2020)	Elaboração de modelo digital de elevação baseado em imagens SRTM, ajustado com informações batimétricas. Elaboração da curva-chave sintética através do <i>software HEC-RAS</i> . Uso do método de valores extremos e do modelo Bayesiano.	Rio Ausable, Nova Iorque, EUA.	Curva-chave sintética, resultado de dados extremos da série histórica. Incorporação de incertezas no método.	Foram adotadas algumas simplificações, devido a falta de medições.	Parcialmente.	Aborda a incerteza na elaboração de curvas-chave, mas utiliza o <i>software HEC-RAS</i> .
3	Mansanarez <i>et al.</i> (2019)	Modelo SPD, que descreve como curvas-chave se modificam ao longo do tempo. Inferência Bayesiana de parâmetros. Distribuição posterior e amostragem de cadeia de Markov e Monte Carlo (MCMC).	Rio Ardèche, França. Rio Wairau, Nova Zelândia.	Confirmação da habilidade do método SPD de ser transferível entre períodos com boas medições e períodos com medições escassas.	Suposição de que os períodos de estabilidade são conhecidos necessitam de análises preliminares. Necessidade de informações disponíveis.	Parcialmente.	Foca em curvas-chave que passaram por mudanças súbitas.
3	Abdelrahman, Moustafa, Elfawy (2018)	Uso do <i>software PCSWMM</i> para modelagem hidrodinâmica, considerando que o projeto do sistema comporta chuvas de 10 anos, enquanto o canal	AlA'alyah, Arábia Saudita.	Uso do modelo hidrodinâmico para auxiliar no projeto da rede de drenagem.	Trabalhos futuros devem examinar a eficiência de simulações.	Não.	É inadequada para o protocolo 3, mas traz a possibilidade de usar modelagens hidrodinâmicas para auxiliar na tomada de decisão de projetos de rede de drenagem.

Protocolo	Autores	Materiais e métodos	Estudo de caso	Vantagens/Resultados importantes	Desvantagens, limitações e/ou desafios	Adequado para a pesquisa?	Por quê?
		comporta chuvas de 100 anos.					
3	Ocio <i>et al.</i> (2017)	Análise e estimativa de incertezas em curvas-chave com dois métodos distintos (BaRatin e VPM). Modelo hidrológico de precipitação-escoamento HBV. Algoritmos de assimilação de dados.	Rio Oria, País Basco, Espanha.	A análise de incertezas serve como indicativo do tamanho e tipo de melhorias potenciais para um sistema de previsões em tempo real quando os erros são reduzidos.	À medida que o parâmetro de incerteza é mais limitado, os estados dos modelos são mais sensíveis durante enchentes.	Sim.	Aborda a incerteza na elaboração de curvas-chave e indica o uso desse estudo para elaborar previsões em tempo real.
3	Clarke, Mendiondo, Brusa (2009)	Análise das curvas-chave dos dois rios de interesse, obtenção da correlação entre vazões estimadas.	Rio Amazonas, Brasil, e Rio Paraná, Argentina.	Quantificação do grau de incerteza de um fluxo anual de dois grandes rios sul-americanos.	---	Parcialmente.	Aborda as incertezas em curvas-chave, mas estuda grandes rios, o que não é o caso de São Carlos.
3	Westerberg <i>et al.</i> (2016)	Uso de conjuntos de dados de séries de 15 minutos de nível d'água. Separação dos fluxos alto, médio e baixo do rio. A incerteza nos parâmetros foi estimada pelo método MCMC. Utilizou-se um método de regionalização baseado em similaridade hidrológica.	Diversos locais na Inglaterra e País de Gales.	Análise do desempenho do método de regionalização (com diferenças para localidades distintas) e da contribuição de diferentes fontes de incerteza.	Informações hidráulicas empíricas podem reduzir incertezas, mas precisam de informações detalhadas e de investigação. O processo de estimativa de curva-chave é complexo e trabalhoso.	Sim.	Aborda a incerteza de curvas-chave.

Protocolo	Autores	Materiais e métodos	Estudo de caso	Vantagens/Resultados importantes	Desvantagens, limitações e/ou desafios	Adequado para a pesquisa?	Por quê?
3	Baldassarre, Montanari (2009)	Levantamentos de campo para registrar dados de vazão e nível d'água. Estimativa da curva-chave e sua calibração, seguindo a Regra ISO EN 748 (1997). Adoção de um modelo para a estrutura de erro. Cálculo de diversas fontes de incerteza.	Rio Itália. Pó,	Proposição de uma metodologia para quantificar a incerteza quando as observações de vazões de rios são derivadas de aplicação do método de curva-chave. Geração de um modelo hidráulico 1D.	Os dados são limitados, então adotou-se um modelo simples para a estrutura de erro. A incerteza induzida pela observação imperfeita do rio foi ignorada. No geral, optou-se por suposições conservadoras, que podem levar à superestimação da incerteza.	Sim.	Aborda a incerteza de curvas-chave.
3	Steinbakk et al. (2016)	Uso de técnicas Bayesianas, da distribuição de dois parâmetros de Gumbel e da distribuição de três parâmetros de valor generalizado extremo (GEV). O modelo de curva-chave utilizado foi de Reitan e Peterson-Øverleir (2009). Uso da técnica MCMC para simulações.	Noruega.	Contribuições para amostragem e algumas suposições por incertezas de curvas. Duração das séries de vazões anuais máximas. Valor agregado de grandes medições. Limites de avaliação de incerteza.	Foram adotadas e algumas suposições por causa dos métodos. Além disso, foram desconsideradas algumas fontes de incerteza que também geram impactos consideráveis.	Sim.	Aborda a incerteza de curvas-chave.

Protocolo	Autores	Materiais e métodos	Estudo de caso	Vantagens/Resultados importantes	Desvantagens, limitações e/ou desafios	Adequado para a pesquisa?	Por quê?
4	Xu et al. (2020)	Uso do <i>software PCSWMM</i> para modelagem hidrodinâmica. Considera a mudança climática e as incertezas de modelos hidrológicos (modelo SOCU) e analisa a incerteza do modelo do <i>PCSWMM</i> .	Ilha Haidian, China	Consideração das incertezas de mudanças climáticas e de modelos hidrológicos. Resultado final consegue ajudar o poder público e as partes interessadas na tomada de decisão.	Dificuldade de quantificar perdas não-econômicas.	Sim.	Utiliza o <i>software PCSWMM</i> para modelagem hidrodinâmica, estuda o gerenciamento de riscos de inundação.
4	Xu et al. (2023)	Uso do <i>software PCSWMM</i> para modelagem hidrodinâmica. Uso do modelo <i>LightGBM</i> , para construir um modelo de previsão rápida de inundações urbanas.	Haikou, China.	Modelo para inundações urbanas (<i>PCSWMM</i>) e modelo de previsão rápida de inundações urbanas (<i>LightGBM</i>). A acurácia do modelo <i>LightGBM</i> foi comprovada.	Maiores evoluções são necessárias devido à limitação de dados.	Parcialmente.	Foca na modelagem para previsão rápida através do <i>LightGBM</i> .
4	Pinos, Timbe (2019)	Uso dos <i>softwares HEC-RAS 2D, Iber 2D, Flood Modeller 2D</i> e <i>PCSWMM 2D</i> para modelagem hidrodinâmica.	Sub-bacia do Rio Santa Bárbara, próxima província Azuay, na região dos Andes	Comparação de modelos hidrodinâmicos de diversos <i>softwares</i> . Mapeamento de manchas de inundações.	Limitação, para o <i>PCSWMM</i> , de uma grelha de 7 m x 7 m. Nos demais programas, de a resolução era de 3 m x 3 m.	Parcialmente.	Foca em áreas de bacias hidrográficas montanhosas.

Protocolo	Autores	Materiais e métodos	Estudo de caso	Vantagens/Resultados importantes	Desvantagens, limitações e/ou desafios	Adequado para a pesquisa?	Por quê?
4	Munir, Ahmad, Hafeez (2019)	Uso do <i>software PCSWMM</i> para modelagem hidrodinâmica e do <i>software Arcgis</i> para delimitar a bacia. Uso do solo classificado através de imagens de satélite <i>Landsat-8</i> .	Bacia hidrográfica Vidor, Distrito D. G. Khan, Paquistão.	Simulações do <i>PCSWMM</i> , análise da extensão de inundações, análise de exposição a inundações rápidas e definição de vulnerabilidade.	Escassez de dados.	Parcialmente.	Estudo aplicado em área rural.
4	Ma <i>et al.</i> (2022)	---	---	---	---	Não.	Foca em impactos na rede viária e utiliza modelos diferentes do desejado.
4	IPCC (2019)	---	---	---	---	Não.	Não aborda o gerenciamento de risco de inundações.
4	Knight <i>et al.</i> (2021)	Uso do <i>software PCSWMM</i> para modelagem hidrodinâmica. Interação entre modelos 1D e 2D através do <i>PCSWMM</i> . Calibração do modelo usando a ferramenta SRTC do próprio <i>PCSWMM</i> .	Sub-bacia da bacia Harvard Gulch, Denver, EUA.	Calibração e validação do modelo, simulação de cenários com infraestrutura verde, análise de tráfego.	Dados indisponíveis foram completados usando uma variedade de métodos. Os efeitos dessas infraestruturas foram distribuídos uniformemente pela área impermeável.	Parcialmente.	Foca no impacto de infraestruturas verdes na mobilidade urbana. Área de estudo nos Estados Unidos (país desenvolvido e com clima diferente do Brasil).

Protocolo	Autores	Materiais e métodos	Estudo de caso	Vantagens/Resultados importantes	Desvantagens, limitações e/ou desafios	Adequado para a pesquisa?	Por quê?
4	Lu, Qin, Jun (2019)	Uso do <i>software PCSWMM</i> para modelagem hidrodinâmica, calibrada através de dados históricos. Obtenção de uma função objetiva, que considere o investimento em projeto urbano sensível à água (<i>WSUD</i>) e os danos causados por inundações.	Local hipotético, em área urbana e tropical.	Simulação de diversos cenários, gerados ao se combinar os diversos parâmetros de interesse. Análise dos impactos da adoção de <i>WSUD</i> na mitigação de danos causados por inundações.	As incertezas são um fator importante e podem influenciar as saídas do modelo. A falta de dados econômicos para o caso de estudo fez com que se adotassem alguns parâmetros a partir de estimativas ou referências.	Parcialmente.	Foco em características do <i>WSUD</i> .
4	Sidek <i>et al.</i> (2021)	Uso do <i>software PCSWMM</i> para modelagem hidrodinâmica.	Represa Damansara, Malásia.	Modelagem do fluxo do rio em uma dimensão, através do <i>software ICM</i> . Comparação entre cenários de drenagem atuais e históricos.	Futuros estudos precisam incluir investigações detalhadas e análises sobre respostas à mudança climática, de uso do solo e de sistemas de drenagem.	Parcialmente.	Foco em área de represa.

Protocolo	Autores	Materiais e métodos	Estudo de caso	Vantagens/Resultados importantes	Desvantagens, limitações e/ou desafios	Adequado para a pesquisa?	Por quê?
4	Perez <i>et al.</i> (2024)	Coleta de dados meteorológicos através do IDEAM. Obtenção do modelo digital de elevação (MDE) através do drone <i>Phantom 3 Advance</i> . Uso do software <i>PCSWMM</i> para modelagem hidrodinâmica, calibrada através da integração de curvas IDF.	Cúcuta, Colômbia.	Geração de mapas de risco para pedestres com SIG, análise de pedestres, interação entre segurança de pedestres e inundações urbanas. Destaque de zonas de perigo.	O estudo não considerou limites de pessoas ou idades e enchentes pluviais, mas espera-se que o conceito de riscos para pedestres seja ainda maior nessas inundações.	Parcialmente	Foco na mobilidade urbana.
4	Chitwatkulsiri <i>et al.</i> (2022)	Avaliação da eficiência da plataforma <i>RTFlood</i> para previsão de inundações urbanas, aplicando-a em 116 enxurradas entre 2015 e 2018. Uso do software <i>TITAN</i> para conduzir a previsão de precipitação. Elaboração de modelo hidrodinâmico através do software <i>PCSWMM</i> .	Polder de Ramkhamhaeng, região metropolitana de Bangkok, Tailândia.	Operação e implementação de sistema <i>RTFlood</i> .	As incertezas envolvidas no estudo merecem maior atenção, pois se e propagam no modelo. O tempo de execução do sistema aumenta à medida que a área de estudo cresce, o que pode impedir a previsão em tempo real.	Sim.	Utiliza o software <i>PCSWMM</i> para modelagem hidrodinâmica, estuda o gerenciamento de riscos de inundação.

Protocolo	Autores	Materiais e métodos	Estudo de caso	Vantagens/Resultados importantes	Desvantagens, limitações e/ou desafios	Adequado para a pesquisa?	Por quê?
4	Yang <i>et al.</i> (2019)	Simulações baseadas em estudos de caso que abordam possíveis causas para o alagamento. Uso do <i>software PCSWMM</i> para modelagem hidrodinâmica. MDE gerado pelo <i>software ArcGis</i> .	Distrito Jingkou, Zhenjiang, China.	Análise da precipitação, análise de alagamentos para os três casos definidos. Avaliação da eficiência da rede de drenagem em relação aos problemas de alagamento.	---	Parcialmente	Foca em alagamentos, mas se utiliza do <i>PCSWMM</i> para modelagem hidrodinâmica e consegue analisar estudos de caso e tirar conclusões a partir deles.
4	Liwanag <i>et al.</i> (2018)	Geração do MDE com o auxílio de dados de satélites. Geração do modelo hidrodinâmico através do <i>software PCSWMM</i> , com a preparação de dados e atributos no ambiente ArcMap, Processo de calibração baseado em dados de campo.	Cidade de Iligan, Filipinas.	Modelo hidrodinâmico do <i>PCSWMM</i> , simulações de diversos eventos (2, 5, 10 e 25 anos), resultados animados de simulações.	Não foi possível monitorar sobretaxas ou inundações, por isso, utilizaram-se "tempestades de projeto" de 2, 5, 10 e 25 anos. Foram assumidas algumas simplificações.	Parcialmente.	Utiliza o <i>software PCSWMM</i> para modelagem hidrodinâmica, estuda o gerenciamento de riscos de inundação, mas cria "tempestades de projeto" para fazer a análise de resultados.
4	Zanchetta, Coulibaly (2022)	Uso do <i>software PCSWMM</i> para modelagem hidrodinâmica. MDE construído com tecnologia LiDAR. Elaboração de um mapa "auto-organizável" (SOM) e de um modelo recorrente para prever o	Bacia do rio Don, Grande Toronto, Canadá.	Geração de mapas de inundação entre 11 e 15 min.	Tempo de simulação longo (entre 4h e 4h30min), o que confirma a inadequação do modelo para monitoramento em tempo real. O modelo precisa ser retreinado toda vez que o local físico é modificado.	Parcialmente.	Foca no gerenciamento de risco de inundações, mas a área de estudo é no Canadá (país desenvolvido e com clima diferente do Brasil).

Protocolo	Autores	Materiais e métodos	Estudo de caso	Vantagens/Resultados importantes	Desvantagens, limitações e/ou desafios	Adequado para a pesquisa?	Por quê?
		melhor nó de topologia, com o auxílio do modelo NARX.					
4	Banjara <i>et al.</i> (2024)	Uso do modelo CA-Markov para uso e cobertura da terra. Uso do <i>software PCSWMM</i> para modelagem hidrodinâmica.	Charlotte, EUA.	Mapas com previsões de mudanças de uso e cobertura do solo (2021, 2050 e 2080) e análise do impacto da mudança no uso e cobertura do solo no fluxo de água.	A metodologia para conseguir os mapas de uso e cobertura do solo pode ser refinada para conseguir melhor acurácia. Não se incluíram os efeitos potenciais das mudanças climáticas.	Parcialmente.	Foca no gerenciamento de risco de inundações em áreas que passaram por rápida urbanização, mas a área de estudo é nos EUA (país desenvolvido e com clima diferente do Brasil).
4	Akhter, Hewa (2016)	Uso do <i>software PCSWMM</i> para modelagem hidrodinâmica, com elaboração de cenários de urbanização e de uso de infraestrutura verde.	Myponga, Austrália.	Análise preliminar de série histórica, análise de sensibilidade de parâmetros usando SRTC. Quantificação dos impactos da urbanização.	---	Parcialmente.	Uso do <i>PCSWMM</i> para avaliar o impacto de mudanças no uso do solo em respostas hidrológicas e a performance de infraestruturas verdes.

7.2. APÊNDICE 02 - TABELA RESUMO DA REVISÃO DE LITERATURA 02

Nº	Referência	Pg.	MDT ou MDE?	Por quê?	Citação
1	GOULARTE, E. R. P.; MARCUZZO, F. F. N.. Delimitação automática de bacias hidrográficas por SIG: procedimentos para tratamento de MDT. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 16.; SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA, 15., 2022, Caruaru, PE. Anais [...]. Caruaru: ABRHidro, 2022.	---	Não se aplica	Os autores comparam diversos MDEs e MDTs, validando o uso de MDEs globais e gratuitos disponibilizados recentemente.	---
2	BRECKENFELD, K. A. A. <i>et al.</i> Avaliação dos novos modelos digitais de elevação globais NASADEM, COPDEM e FABDEM comparativamente a dados LIDAR. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 16.; SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA, 15., 2022, Caruaru, PE. Anais [...]. Caruaru: ABRHidro, 2022.	1	Não se aplica	Os autores usam o termo MDE e MDT sem diferenciação.	"Este trabalho tem como objetivo principal transformar um MDT, também denominado de Modelo Digital de Elevação (MDE), em um Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC)."

N°	Referência	Pg.	MDT ou MDE?	Por quê?	Citação
3	RODRIGUES, E. A. M.; FARIAS, M. de O.; CIRILO, J. A. Avaliação da influência da resolução do modelo digital do terreno sobre a geração da rede de drenagem em uma bacia hidrográfica. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 15., 2020, Caruaru, PE. Anais [...]. Caruaru: ABRHidro, 2020.	8	MDT	O objetivo é obter a rede hídrica da bacia.	"A obtenção da rede hídrica de uma bacia por Modelos Digitais de Terreno (MDTs) de alta resolução espacial é um procedimento que traz significativo aumento de precisão no processo de traçado das redes de rios. Como pode-se observar no estudo da geração da rede de drenagem na bacia do Ipojuca pelos MDTs numa escala de 1:1.000, 1:5.000 e 1:250.000, a partir das bases de dados do PE3D e TOPODATA. No entanto, o ganho de qualidade se reflete em significativo aumento do esforço computacional. (...) Por fim, foi observado que o uso dos MDEs provenientes do levantamento do SRTM na geração da rede hídrica apresenta resultados satisfatórios, entretanto, para análises locais em áreas menores como áreas alagáveis por cheias, o uso de parâmetros provenientes dos MDTs de alta resolução se torna mais eficiente, apresentando menores distorções."
4	MUSTAFA, A. <i>et al.</i> GIS-based hydrodynamic modeling for urban flood mitigation in fast-growing regions: a case study of Erbil, Kurdistan Region of Iraq. <i>Scientific reports</i> , v. 13, n. 1, p. 8935, 2023.	4 <hr/> 8	MDE	O artigo analisa duas técnicas de representação de edifícios: <i>Building Block</i> (BB) e <i>Building Resistance</i> (BR). Os resultados revelaram que é possível aplicar a técnica BR dentro do HEC-RAS 2-D para criar modelos de inundação urbana para regiões que têm falta de dados ou baixa qualidade de dados.	"O Modelo Digital de Terreno (MDT) é responsável por induzir a maioria das características topográficas do estudo no modelo HEC RAS 2-D. Usando um MDE como arquivo de entrada, o HEC RAS 2-D é capaz de criar um MDT dentro do programa. Especificamente, um MDE mais edifícios com resolução de 1 m foi preparado para uso na geração do MDT da área de estudo neste caso." <hr/> "As resoluções do MDE e de malha são os elementos mais significativos a serem considerados ao executar simulações de dinâmica de nível de água usando a técnica BB. Por outro lado, o coeficiente de rugosidade da planície de inundação é uma consideração crucial para mapear a extensão da planície de inundação."

N°	Referência	Pg.	MDT ou MDE?	Por quê?	Citação
5	JEONG, C. <i>et al.</i> Selection of elevation models for flood inundation map generation in small urban stream: Case study of Anyang stream. <i>Advances in technology innovation</i> , v. 9, n. 1, p. 28–41, 2023.	30 - 31	MDE	<p>O artigo busca gerar mapas de inundação mais precisos e detalhados para eventos de inundação devido ao transbordamento de rios em pequenas áreas urbanas. Para isso, a investigação sobre inundações é realizada usando o sistema de análise de rios, HEC-RAS 2D, com o MDS e o MDE de áreas urbanas na Bacia do Riacho Anyang, Coreia, para examinar as diferenças entre dados de terreno e área inundada. Além disso, para áreas urbanas com edifícios densos e redes rodoviárias congestionadas, a análise de inundação com base no MDS pode representar uma situação de inundação mais realista e criar um mapa de inundação mais adequado.</p>	<p>"O MDE são dados de terreno que indicam a altura da superfície do solo, excluindo informações de altura de edifícios ou vegetação. Enquanto o MDS pode fornecer informações detalhadas sobre a altura e a localização de todos os objetos na superfície da Terra, incluindo edifícios e vegetação, mas pode não representar com precisão o nível real do solo. O MDS pode levar a uma superestimação da profundidade e extensão da inundação porque contém informações não apenas sobre edifícios, mas também sobre objetos que interferem na análise de inundações. Por esse motivo, o MDE é atualmente preferido ao MDS para mapeamento de inundação de inundação. No entanto, com o desenvolvimento recente da tecnologia de topografia, a tecnologia de construção MDS usando tecnologia LiDAR ou drone foi desenvolvida. Isso pode gerar economicamente dados topográficos de maior qualidade e precisão do que antes [11], portanto, é necessário revisar a análise de inundações com base no MDS."</p>

N°	Referência	Pg.	MDT ou MDE?	Por quê?	Citação
		36 - 37			<p>"(...) O MDE, que é baseado em dados do terreno sem considerar estruturas, não conseguiu prever com precisão a profundidade e a velocidade exatas para cada local. No entanto, o MDS, que considera o fluxo entre edifícios, conseguiu expressar o efeito dos edifícios nas inundações. (...) Foi observada uma diferença de mais de 1,0 m no nível de inundação, devido à área de ocupação dos edifícios. (...) A velocidade mostrou um valor mais alto quando baseada no MDS, mas não pode ser considerada precisa e detalhada, pois não considera a influência dos edifícios. No entanto, nos resultados baseados em MDS, a velocidade perto dos edifícios é maior do que em outras áreas. (...) variações na velocidade foram observadas como diferentes com base na densidade de edifícios (a proporção da área total de uma seção ocupada por edifícios) ao comparar as velocidades obtidas do MDE e aquelas obtidas do MDS. (...) Geralmente, um aumento na velocidade é observado em proporção à extensão da cobertura do edifício. Este fenômeno é particularmente pronunciado em áreas urbanas densamente povoadas, em que as diferenças entre as velocidades no MDE e no MDS são substanciais. Portanto, é aconselhável considerar um aumento na velocidade correspondente à densidade de edifícios ao interpretar os resultados de velocidade obtidos do MDE."</p>

N°	Referência	Pg.	MDT ou MDE?	Por quê?	Citação
		39 - 40			<p>"Como o MDS representa informações de terreno que se assemelham muito à topografia real em comparação ao MDE, conduzir análises de inundação com base no MDS nos permite criar um mapa de inundação mais realista. A análise precisa de inundação usando dados do MDE em áreas densamente urbanizadas com vários edifícios e infraestrutura é desafiadora. Como Seul, Coreia, continua a experimentar rápida urbanização e expansão, empregar o DSM para análise de inundação por inundação pode ser uma abordagem adequada para planejamento detalhado de evacuação e defesa. Além disso, este estudo usou suas descobertas para calcular danos por inundação, defendendo que a criação de mapas de inundação usando MDS é apropriada. A afirmação não se baseia somente nas diferenças em informações diretas, como profundidade e velocidade, entre mapas de inundação gerados pelo MDS e MDE. Em vez disso, ela decorre da avaliação da adequação do MDS para produzir mapas de inundação de inundação da perspectiva da estimativa de danos por inundação."</p>
6	CHOWDHURY, M. S. Modelling hydrological factors from DEM using GIS. <i>MethodsX</i> , v. 10, n. 102062, p. 102062, 2023.	2	MDE	O artigo usa diferentes métodos de modelagem hidrológica usando MDE e SIG.	<p>"Nos últimos anos, a maior disponibilidade de DEM e os avanços em sistemas de informação geográfica (SIG) têm apoiado uma representação detalhada e mais realista da topografia da superfície [3]. Como resultado, a modelagem hidrológica se tornou mais precisa, detalhada e menos demorada [4–6]. Vários fatores e características da superfície terrestre derivados do modelo hidrológico são popularmente usados em muitas aplicações científicas, de engenharia e de planejamento [2]."</p>

N°	Referência	Pg.	MDT ou MDE?	Por quê?	Citação
7	MOGES, D. M. <i>et al.</i> How does the choice of DEMs affect catchment hydrological modeling? <i>The Science of the total environment</i> , v. 892, n. 164627, p. 1 - 15, 2023.	8	Não se aplica	O autor compara diferentes MDEs para modelagem hidrológica, mas não compara com MDT.	"O desempenho de todos os MDEs foi geralmente mais fraco na bacia hidrográfica de Porijõgi em comparação com outras bacias hidrográficas, principalmente devido à presença de cobertura florestal densa e topografia mais plana. Essa descoberta está alinhada com os resultados de González-Moradas <i>et al.</i> (2023), que indicaram a dificuldade em delinear com precisão bacias de drenagem em bacias hidrográficas com terreno plano e vegetação densa. De acordo com Guth e Geoffroy (2021), a precisão dos MDEs tende a melhorar à medida que a cobertura do solo transita de floresta fechada para floresta aberta e vegetação mais curta, devido às diferentes profundidades de penetração do sensor em diferentes coberturas do solo. A influência da cobertura do solo na qualidade do MDE é particularmente pronunciada em áreas com declives suaves (Li <i>et al.</i> , 2020). No entanto, COP30 e MERIT exibiram desempenho razoável na bacia hidrográfica de Porijõgi devido às suas correções hidrológicas (Fahrland <i>et al.</i> , 2022; Yamazaki <i>et al.</i> , 2019)."
8	GUTH, P. L. <i>et al.</i> Digital elevation models: Terminology and definitions. <i>Remote sensing</i> , v. 13, n. 18, p. 3581, 2021.	13	MDT	O artigo aborda terminologias e definições sobre MDEs. Os autores adotam que MDE é a terminologia geral, e pode ser dividido em MDT e MDS.	"(...) As aplicações hidrológicas preferem um MDT, que pode exigir reforço de drenagem, mas, dependendo da escala, podem combiná-lo com edifícios adicionados localmente a partir de um produto 3D ou de um MDS com espaçamento de grade mais fino."
9	RIBEIRO, H. J.; FERREIRA, N. C. Análise comparativa de redes hidrológicas geradas a partir de superfícies hidrologicamente consistentes. <i>Boletim de Ciências Geodésicas</i> , v. 20, n. 4, p. 784–805, 2014.	800	Não se aplica	Apesar de o artigo fazer uma comparação entre MDE e MDT, não há um resultado claro em que um é melhor que o outro. Apenas conclui-se que, com as devidas correções, ambos são adequados.	"De modo geral a rede extraída do a partir do MDE topodata ajustou-se bem à rede de referência. Neste caso houve pouca divergência entre a rede estimada e a corrigida. Nas áreas com nível de urbanização mais intenso, houve uma tendência na formação de canais inexistentes. Explica-se a formação de falsos canais pelo mesmo princípio citado anteriormente no GDEM. Locais com uma grande densidade de objetos acima do solo podem gerar um MDE com valores de altitude que não representam a altitude do solo, e sim os alvos que estão sobre

N°	Referência	Pg.	MDT ou MDE?	Por quê?	Citação
		802 803	-		<p>ele."</p> <p>"De modo geral, percebe-se que praticamente todas as redes hidrológicas estimadas a partir das superfícies sem correção tiveram tendências na geração de falsos canais, o que confirma a dificuldade atual de se definir feições hidrológicas em áreas relativamente planas. Essa dificuldade aumenta ainda mais, no caso de áreas de relevo plano, com intenso processo de urbanização. (...) Em aplicações hidrológicas, quando se dispõe de modelos digitais de terreno de alta resolução espacial, faz-se necessário a realização de generalizações e processamentos adicionais, considerando a rede hidrográfica, com o objetivo de minimizar os detalhes altimétricos decorrentes da urbanização, que podem prejudicar as análises hidrológicas."</p>

N°	Referência	Pg.	MDT ou MDE?	Por quê?	Citação
10	CRONEBORG, L. <i>et al.</i> Digital elevation models: A guidance note on how digital elevation models are created and used - includes key definitions, sample terms of reference, and how best to plan a DEM-mission. [s.l.] World Bank, Washington, DC, 2020.	6	Não se aplica	Para os autores: "Conforme usado aqui, os DTMs usam DEMs como ponto de partida, mas também podem incorporar a elevação de características topográficas significativas na terra e alterar pontos e linhas de quebra que são espaçados irregularmente para melhor caracterizar a forma real do terreno de terra nua. O resultado líquido é que as características distintas do terreno são mais claramente definidas, e os contornos gerados a partir de DTMs se aproximam mais da forma real do terreno. Esses DTMs são normalmente mais caros e demorados para produzir do que DEMs uniformemente espaçados porque as linhas de quebra são inadequadas para automação. Os resultados de DTM são tecnicamente superiores aos DEMs padrão para muitas aplicações. Os DSMs são semelhantes aos DEMs ou DTMs, exceto que eles descrevem as elevações das superfícies superiores de edifícios, árvores, torres e outras características elevadas acima da terra nua. Os DSMs são especialmente relevantes para gerenciamento de	"Os gestores de águas pluviais dependem muito de MDEs para monitorar e modelar bacias hidrográficas, córregos e outros canais de fluxo. Os MDEs podem rastrear processos hidrológicos (como modelar o fluxo de volume da água durante eventos de pico de chuva) e processos hidráulicos (modelar onde essa água fluirá e como a água pluvial interagirá com estruturas como bueiros e pontes). Em conjunto com a morfologia do canal modelada a partir de MDEs e sensoriamento remoto associado, dados sobre estruturas existentes podem ser coletados de mapas municipais ou de fontes de sensoriamento remoto dos DEMs. Uma câmera colorida de alta resolução espacial, por exemplo, usada com Lidar, pode adicionar dados, classificando estruturas por altura e forma, o que informa mais completamente o fluxo de águas pluviais e as interações na paisagem. Esse uso de MDEs geralmente é focado em áreas urbanas, mas a morfologia do canal interage com estruturas artificiais em ambientes rurais também."

N°	Referência	Pg.	MDT ou MDE?	Por quê?	Citação
				telecomunicações, gerenciamento florestal, segurança aérea, modelagem 3D e simulação." (pg. 48). Ou seja, não se aplica porque não é possível distinguir qual dos dois os autores abordam.	
11	MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. Hydrological processes, v. 5, n. 1, p. 3–30, 1991.	---	Não se aplica	Os autores consideram que: "Um Modelo Digital de Elevação (MDE) é uma matriz ordenada de números que representa a distribuição espacial de elevações acima de algum datum arbitrário em uma paisagem. Pode consistir em elevações amostradas em pontos discretos ou na elevação média sobre um segmento específico da paisagem, embora na maioria dos casos seja o primeiro. MDEs são um subconjunto de Modelos Digitais de Terreno (MDTs) que podem ser definidos como matrizes ordenadas de números que representam a distribuição espacial de atributos do terreno." A diferenciação entre os dois não é abordada como se busca e não há comparação entre os dois tipos.	---

Nº	Referência	Pg.	MDT ou MDE?	Por quê?	Citação
12	BALASUBRAMANIAN, A. Digital elevation model (DEM) in GIS, Sep. 2017. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/319454004_DIGITAL_ELEVATION_MODEL_DEM_IN_GIS >. Acessado em: 19 set. 2024.	4	MDE	Para o autor, MDE é um subconjunto de MDT. A diferença é que o MDE também representa outros elementos morfológicos. Essa diferenciação se enquadra no que buscamos.	"Os MDEs são amplamente utilizados em análises hidrológicas e geológicas, monitoramento de riscos, exploração de recursos naturais, gestão agrícola, etc."
13	TARBOTON, D. Terrain Analysis Using Digital Elevation Models in Hydrology. In: INTERNATIONAL USERS CONFERENCE, 23., 2003, San Diego, CA. Anais [...]. San Diego: ESRI, 2005.	---	Não se aplica	O artigo discorre apenas sobre MDEs. Não fica claro se há diferenciação entre MDT e MDE, pois não fala sobre MDTs.	"A análise de terreno baseada em modelos digitais de elevação está sendo cada vez mais usada em hidrologia (por exemplo, Wilson e Gallant, 2000). Isso é impulsionado pela disponibilidade de dados digitais de elevação, nacionalmente do USGS (2003) e mundialmente, incluindo dados baseados no espaço disponíveis na missão do ônibus espacial TOPSAR da NASA. Isso também é impulsionado pelo crescente poder computacional disponível em computadores pessoais com a capacidade de baixar e processar rapidamente dados de modelos digitais de elevação (MDE) e usar atributos topográficos extraídos de MDEs em modelos hidrológicos."
14	ETTRITCH, G. et al. Enhancing digital elevation models for hydraulic modelling using flood frequency detection. Remote sensing of environment, v. 217, n. 1, p. 506–522, 2018.	---	Não se aplica	O artigo discorre apenas sobre MDEs. Não fica claro se há diferenciação entre MDT e MDE, pois não fala sobre MDTs. Nota-se, entretanto, que os autores falam sobre remoção da vegetação, então acho que o foco é em MDT.	---

N°	Referência	Pg.	MDT ou MDE?	Por quê?	Citação
15	WECHSLER, S. P. Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review. <i>Hydrology and earth system sciences</i> , v. 11, n. 4, p. 1481–1500, 2007.	1483	Não se aplica	O artigo aborda apenas MDEs, então não há comparação. Além disso, é um confuso se o autor usa MDE como sinônimo de MDT ou não.	"Atributos topográficos frequentemente usados em análises hidrológicas são derivados diretamente de MDEs. Erros de MDE se propagam para parâmetros derivados. Embora existam vários algoritmos para gerar esses parâmetros hidrológicos, os pacotes de <i>software</i> SIG limitam a capacidade dos usuários de selecionar algoritmos específicos. Além disso, a comunidade hidrológica não chegou a um consenso sobre algoritmos apropriados para certos parâmetros topográficos (como direção do fluxo)."
16	GUO, K.; GUAN, M.; YU, D. Urban surface water flood modelling – a comprehensive review of current models and future challenges. <i>Hydrology and earth system sciences</i> , v. 25, n. 1, p. 2843–2860, 2021.	2846	MDE	Os autores discorrem sobre o uso de MDE para modelagem hidrodinâmica em diversos usos. Eles também citam que a resolução e a acurácia de MDTs é um desafio para abordagens hidrogeomórficas (pg. 2855), então há a diferenciação.	"Um modelo de rede de drenagem é geralmente acoplado a um modelo hidrológico ou hidráulico urbano para quantificar o escoamento superficial na superfície urbana. Por exemplo, modelos hidrológicos urbanos, como o <i>Urban Drainage and Sewer Model</i> (MOUSE) (DHI, 2004), EPA SWMM (Rossmann, 2010) e outros modelos de pesquisa (Schmitt et al., 2004; Simões et al., 2010), são frequentemente implementados ou redesenvolvidos para simular a precipitação urbana-escoamento e sobrecarga de inundação de furos de manutenção de drenagem. No entanto, esses modelos não podem reproduzir os processos dinâmicos de inundação urbana. Para simular inundações de águas superficiais urbanas, foram desenvolvidos modelos de drenagem dupla que combinam redes de drenagem com redes de ruas urbanas (Djordjevic et al., 2005; Simões et al., 2010). Durante eventos de inundação, os fluxos de tubos de drenagem geralmente produzem sobrecarga em bueiros de drenagem urbana, resultando em inundações na superfície da rua."

N°	Referência	Pg.	MDT ou MDE?	Por quê?	Citação
		2847			"Nas últimas décadas, dados de modelos digitais de elevação (MDE) e modelos digitais de superfície (MDS) de alta resolução com informações espaciais mais detalhadas estão cada vez mais disponíveis. Modelos hidrodinâmicos construídos sobre SWEs demonstraram fortes capacidades em fornecer informações mais detalhadas sobre inundações em áreas urbanas, como profundidades e velocidades de águas de inundação distribuídas. Modelos baseados em SWEs têm sido frequentemente aplicados a inundações fluviais e costeiras, mas foram recentemente refinados para inundações de águas superficiais urbanas (Gómez et al., 2011; Xia et al., 2017)."
17	CEA, L.; COSTABILE, P. Flood risk in urban areas: Modelling, management and adaptation to climate change. A review. <i>Hydrology</i> , v. 9, n. 50, p. 1 - 35, 2022.	---	Não se aplica	Os autores apenas abordam o MDT, e não citam o MDE.	---
18	CAMANA, J. C. Modelos digitais de elevação: aplicações em bacias hidrográficas. Medianeira: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 23 Jun. 2016.	26 36	Não se aplica	A autora aborda o uso de MDEs para estudos hidrológicos. Mas ela usa MDE como uma generalização de MDS e MDT.	"O MDT tem sido a forma mais utilizada para representação das características físicas de uma superfície em aplicações de Sistemas de Informação Geográficas (SIG)." "Oferece a possibilidade de extrair curvas de nível a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), seja de Superfície (MDS) ou de Terreno (MNT), e apresenta facilidade de uso aceitando vários formatos de exportação e importação."