



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

LETÍCIA DAS NEVES FELIX

**AVALIAÇÃO DO USO DE BACIAS DE DETENÇÃO COMO ESTRATÉGIA
PARA DIMINUIÇÃO DA VAZÃO DE PICO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO
RIO TINTO-PB**

João Pessoa - PB

Abril - 2025

LETÍCIA DAS NEVES FELIX

**AVALIAÇÃO DO USO DE BACIAS DE DETENÇÃO COMO ESTRATÉGIA
PARA DIMINUIÇÃO DA VAZÃO DE PICO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO
RIO TINTO-PB**

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

Orientador: Prof. Gustavo Barbosa
Lima da Silva.

João Pessoa - PB

Abril - 2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Catálogo na publicação Seção de Catalogação e Classificação

F316a Felix, Leticia das Neves.

AVALIAÇÃO DO USO DE BACIAS DE DETENÇÃO COMO
ESTRATÉGIA PARA DIMINUIÇÃO DA VAZÃO DE PICO NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO TINTO-PB / Leticia das Neves Felix.
- João Pessoa, 2025.
82 f. : il.

Orientação: Gustavo Barbosa Lima da Silva.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Bacias de retenção. 2. Inundação. 3. HEC-HMS. 4.
Escoamento superficial. I. Silva, Gustavo Barbosa Lima
da. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

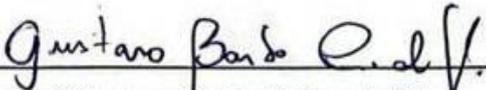
CDU 504(043.2)

FOLHA DE APROVAÇÃO

LETÍCIA DAS NEVES FELIX

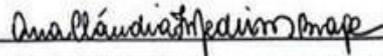
AVALIAÇÃO DO USO DE BACIAS DE DETENÇÃO COMO ESTRATÉGIA PARA DIMINUIÇÃO DA VAZÃO DE PICO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TINTO-PB

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em 30/04/2025 perante a seguinte comissão julgadora:

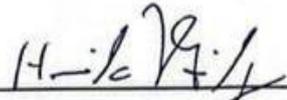

Prof. Gustavo Barbosa Lima da Silva

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do
CT/ UFPB

APROVADO
(Aprovado/Reprovado)


Prof.^a Ana Claudia Fernandes Medeiros Braga
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do
CT/ UFPB

Aprovado
(Aprovado/Reprovado)


Prof. Hamilcar José Almeida Filgueira
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do
CT/ UFPB

Aprovado
(Aprovado/Reprovado)

Documento assinado digitalmente



ALINE FLÁVIA NUNES REMÍGIO ANTUNES
Data: 06/05/2025 17:00:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Aline Flávia Nunes Remígio Antunes
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus com a Santíssima Trindade a quem entrego toda a minha vida e meus planos, que me concede força, ânimo e discernimento a cada dia pra enfrentar todas as adversidades com fé e confiança.

À minha família: meu pai Givanildo Felix e minha mãe Rosineide Felix que são os meus alicerces aqui na terra e sempre fizeram e fazem tudo pela minha educação e felicidade e acima de tudo me dão amor e carinho incondicional. Ao meu irmão Ryann Felix, peça fundamental desse alicerce e um grande parceiro na minha vida. Às minhas tias, em especial Josiane Neves por todo suporte e acolhimento, aos meus queridos primos, em especial Lívia por ser sempre minha confidente e melhor amiga. À minha Vovó Silva, por todo amor.

Ao meu companheiro de vida, que também é minha família, meu melhor amigo e namorado, Vittoryan Figueirêdo por todo apoio, cuidado e carinho. Por ser um porto seguro que foi essencial durante todos esses anos dentro e fora da universidade.

Aos colegas e amigos que o dia a dia na universidade uniu, pela oportunidade de dividir sentimentos, seja de felicidade ou angústia e pelos momentos de descontração que tornaram melhores os dias dentro da universidade e que com certeza farão falta.

Ao orientador deste projeto, professor Gustavo Barbosa, pela disponibilidade, paciência e por todos os ensinamentos tanto nas disciplinas ministradas como durante o desenvolvimento do TCC. Um excelente profissional, que faz jus ao cargo que possui.

E a todos os demais professores e profissionais que tiveram sua contribuição no meu aprendizado que também corroborou para o desenvolvimento desse trabalho.

RESUMO

O crescimento populacional acelerado e a urbanização desordenada têm intensificado os problemas relacionados a desastres ambientais. A impermeabilização do solo, aliada à ocupação inadequada de várzeas e planícies de inundação, tem aumentado expressivamente os riscos associados a alagamentos e inundações. Historicamente, as soluções de drenagem adotaram um modelo que prioriza a rápida condução das águas pluviais, o que se mostrou ineficiente principalmente frente à complexidade dos eventos extremos. Com o avanço do conhecimento técnico, buscam-se soluções estruturais como as bacias de retenção, que retardam o escoamento e atenuam os picos de cheia. O presente trabalho teve como objetivo analisar os parâmetros hidrológicos da bacia hidrográfica do Rio Tinto, PB, com foco na mitigação de inundações na rodovia PB-041, por meio da implantação de bacias de retenção simuladas no software HEC-HMS. Foram considerados três cenários: Cenário 0 (sem intervenção), Cenário 1 (com uma única bacia de retenção) e Cenário 2 (com múltiplas bacias). O Cenário 1 apresentou melhor desempenho, com atenuação de aproximadamente 38% da vazão de pico no exutório, além de oferecer maior simplicidade operacional e menor risco de liberação simultânea de águas. No Cenário 2, a alternativa com duas bacias foi descartada por sua baixa eficácia, enquanto a simulação com três reservatórios atingiu cerca de 37% de atenuação, porém implicou em riscos de sincronização dos picos de vazão. Dessa forma, concluiu-se que o Cenário 1 é a solução mais eficiente e viável para o controle de cheias na área estudada.

Palavras-chave: bacias de retenção, inundação, HEC-HMS, escoamento superficial.

ABSTRACT

Accelerated population growth and unplanned urbanization have intensified problems related to environmental disasters. Soil impermeabilization, combined with the inadequate occupation of floodplains and lowlands, has significantly increased the risks associated with flooding and inundation. Historically, drainage solutions have followed a model that prioritizes the rapid conveyance of stormwater, which has proven inefficient mainly in the face of increasingly complex extreme weather events. With advances in technical knowledge, structural solutions such as detention basins have been sought, aiming to delay runoff and reduce peak flows. This study aimed to analyze the hydrological parameters of the Rio Tinto watershed, in Paraíba (PB), focusing on flood mitigation along the PB-041 highway through the implementation of detention basins simulated using the HEC-HMS software. Three scenarios were considered: Scenario 0 (no intervention), Scenario 1 (a single detention basin), and Scenario 2 (multiple basins). Scenario 1 showed the best performance, achieving approximately 38% reduction in peak discharge at the outlet, while also offering greater operational simplicity and lower risk of simultaneous water release. In Scenario 2, the alternative with two basins was discarded due to low effectiveness, while the simulation with three reservoirs achieved about 37% attenuation, but introduced risks related to the synchronization of peak flows. Therefore, it was concluded that Scenario 1 represents the most efficient and feasible solution for flood control in the study area.

Keywords: detention basins, flooding, HEC-HMS, surface runoff.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS	11
1.1.1. Objetivo geral	11
1.1.2. Objetivos específicos	11
1.2 JUSTIFICATIVA.....	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1. IMPACTOS DO USO DO SOLO NO CICLO HIDROLÓGICO	14
2.2. INUNDAÇÕES	16
2.3. ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO DE INUNDAÇÕES	19
2.3.1. Medidas não estruturais	19
2.3.2. Medidas estruturais.....	21
2.4 ESTUDOS HIDROLÓGICOS	26
2.4.1 Tempo de concentração	26
2.4.2 Chuva de Projeto	26
2.5 MODELAGEM CHUVA-VAZÃO	28
2.5.1 Métodos para precipitação efetiva.....	28
2.5.2 Modelos Chuva-Vazão	29
2.5.3 Modelagem hidrológica computacional	30
2.5.4 Modelagem no HEC HMS	32
3. METODOLOGIA	34
3.1 DELIMITAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA.....	34
3.2 PRÉ-PROCESSAMENTO DA BACIA HIDROGRÁFICA NO HEC-HMS.....	34
3.2.1 Discretização da bacia hidrográfica.....	34
3.3 PARÂMETROS HIDROLÓGICOS	35
3.3.1 Tempo de concentração	35
3.3.2 Tempo de retorno	37
3.3.3 Chuva de projeto.....	37
3.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA NO HEC-HMS	45
3.4.1. Vazão de projeto.....	45
3.4.2. Pré-dimensionamento das bacias de detenção.....	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1 ASPECTOS GERAIS DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS	52
4.1.1. Análise da delimitação e discretização da bacia hidrográfica	52
4.1.2. Análise dos parâmetros hidrológicos.....	55

4.2 ANÁLISE DO CENÁRIO SEM BACIA DE DETENÇÃO.....	60
4.3 ANÁLISE DAS HIPÓTESES COM BACIA(S) DE DETENÇÃO	66
4.3.1. Parâmetros do reservatório	66
4.3.2. Comparação entre hipóteses	73
5. CONCLUSÃO	76
REFERÊNCIAS	77

1. INTRODUÇÃO

O uso inadequado do solo, impulsionado pelo crescimento populacional acelerado e pela urbanização desordenada, tem gerado interferências relevantes na dinâmica natural do escoamento superficial (Ferraz, 2021). Esse cenário é agravado, sobretudo, pela intensificação de áreas impermeáveis, que comprometem a capacidade de infiltração da água no solo. Como resultado, a água pluvial passa a escoar superficialmente em maior volume e velocidade, intensificando a ocorrência de alagamentos em áreas urbanas e elevando os riscos de inundações. Além disso, a ocupação inadequada de áreas próximas aos rios, muitas vezes realizada sem o devido estudo e planejamento, desconsidera os impactos de eventos de chuvas intensas, aumentando os riscos para a população local.

Historicamente, as cidades se estabeleceram próximas a corpos d'água devido à sua importância para a subsistência humana. No entanto, a ocupação de áreas naturalmente destinadas ao extravasamento de rios e córregos, como várzeas e planícies de inundação, para fins de urbanização impactou a sua função original (Nakazone, 2005). Esse desequilíbrio entre ocupação humana e dinâmica natural dos rios elevou não apenas a frequência, mas também a intensidade dos eventos de inundação, gerando impactos socioeconômicos e ambientais. Esse fenômeno se tornou um dos grandes desafios da atualidade, impactando não só as grandes cidades, mas também causando preocupação em municípios de menor porte.

Além disso, as mudanças climáticas atuam como intensificadoras desses eventos, contribuindo para o aumento da frequência e da gravidade de secas e inundações em diversas regiões do mundo. Esse cenário evidencia que fenômenos climáticos recorrentes, que antes ocorriam em ciclos de alguns anos ou décadas, têm se tornado mais frequentes, refletindo as alterações no clima global (Ferreira e Kemenes, 2019). E com uma população crescente, e urbanização cada vez mais acentuada ocupando áreas inadequadas, os extremos provocam impactos nunca observado antes (Dias, 2014).

Inicialmente, as soluções de drenagem urbana adotavam uma abordagem de caráter “higienista”, fundamentada, principalmente, na canalização e no rápido escoamento das águas pluviais para os corpos d'água localizados a jusante. No entanto, essa prática frequentemente resultava na sobrecarga dos sistemas de macrodrenagem, agravando os episódios de cheias nas regiões rio abaixo (Canholi, 2014).

Com o tempo, a experiência acumulada e uma visão mais integrada da gestão urbana levaram à revisão desse modelo. Constatou-se que simplesmente transferir os picos de vazão para jusante, aumentava a frequência e a intensidade dos eventos extremos, tornando o sistema insustentável para as comunidades afetadas (Nakazone, 2005).

Diante disso, passaram a ser estudadas novas soluções estruturais voltadas à readequação e ao aumento da eficiência dos sistemas de drenagem urbana. Segundo Canholi (2014), essa abordagem caracteriza-se por:

- Retardamento do escoamento superficial, visando aumentar o tempo de concentração;
- Redução das vazões máximas por meio da implantação de reservatórios de detenção;
- Contenção local do escoamento (*runoff*) por meio de técnicas de infiltração;
- Uso de tanques de retenção para amortecer os picos de cheia.

Nesse contexto, a bacia hidrográfica torna-se uma unidade fundamental de análise, por responder de maneira imediata ou progressiva às transformações no ambiente físico, sejam elas causadas por fenômenos naturais ou, sobretudo, por ações antrópicas (Melo, 2007). Portanto, a sua utilização como recorte espacial para realização de estudos hidrológicos, que permitam caracterizar o regime de chuvas, os processos de escoamento e a vazão gerada no exutório da bacia hidrográfica, é importante para compreender impactos e propor medidas mitigadoras.

De acordo com Chow (1988), modelos hidrológicos são ferramentas importantes para avaliar o comportamento de uma bacia hidrográfica com base em dados de precipitação projetada, considerando diferentes durações e frequências. Esses modelos também possibilitam simular cenários hipotéticos, permitindo prever eventos críticos e avaliar os riscos associados.

Portanto, a modelagem da bacia hidrográfica e da rede de macrodrenagem desempenha um papel estratégico no planejamento e gerenciamento da drenagem urbana. A aplicação de modelos hidrológicos e hidráulicos permite simular a resposta da bacia hidrográfica diante de diferentes variáveis de entrada, por meio de ferramentas computacionais que compõem os chamados modelos matemáticos de simulação hidrológica e hidráulica (Canholi, 2014).

Diante disso, este trabalho teve o propósito de realizar uma análise hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Tinto – PB, com perspectiva de propor soluções de macrodrenagem com ênfase em bacias de detenção, por meio da simulação no HEC-HMS. As bacias de detenção são estruturas que visam retardar o escoamento superficial e atenuar as vazões que chegam ao

exutório, como forma de mitigar os episódios de inundação que tornam a rodovia PB-041, principal via de acesso da cidade, intransitável durante períodos chuvosos (G1, 2022), além de reduzir a vulnerabilidade das áreas situadas entorno do rio.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

Avaliar a eficácia de reservatórios de retenção na atenuação do pico de vazão na bacia hidrográfica do Rio Tinto, visando minimizar o risco de desastres por inundação.

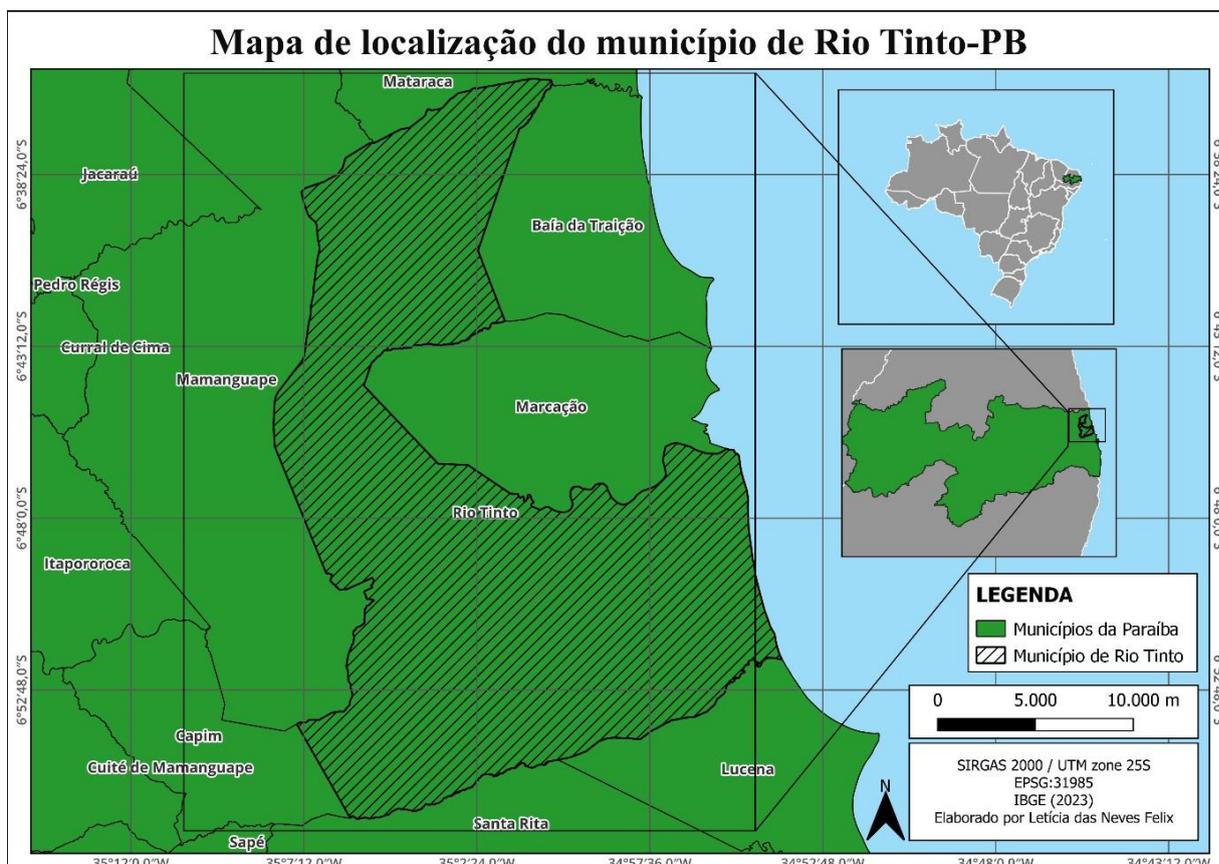
1.1.2. Objetivos específicos

- Avaliar os parâmetros hidrológicos da bacia hidrográfica e sua resposta a eventos de precipitação;
- Realizar o pré-dimensionamento de bacias de retenção para atenuação do pico de vazão na bacia hidrográfica por meio de simulação hidrológica;
- Analisar o nível de atenuação para os Cenários 1 e 2, identificando o cenário ótimo.

1.2 JUSTIFICATIVA

O município de Rio Tinto (Figura 1) com, aproximadamente, 24 mil habitantes e uma área de cerca de 465 km² (IBGE, 2022), apresenta um índice muito alto de ameaça para a eventos de inundações, enxurradas e alagamentos, de acordo com dados da plataforma AdaptaBrasil, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações - MCTI (2025). Ainda segundo a Plataforma, os planos de contingência, os sistemas de alerta, as ações adaptativas e os instrumentos de gestão do uso e ocupação do solo, atualmente existentes no município, exercem impacto mínimo na mitigação desses eventos. Esse cenário evidencia deficiência tanto na elaboração quanto na efetiva implementação de estratégias para enfrentamento e adaptação frente a esses desastres.

Figura 1: Localização do município de Rio Tinto-PB.



Fonte: elaboração própria.

Em reforço a isso, Rio Tinto apresenta um histórico de inundações e alagamentos que afetam tanto a área urbana quanto as regiões ribeirinhas. Em fevereiro de 2025 (Figura 2), por exemplo, o transbordamento do Rio Mamanguape, um dos principais tributários do município (CPRM, 2005), provocou inundações que atingiram cerca de 1.500 pessoas, majoritariamente em comunidades ribeirinhas.

Figura 2: Inundações na cidade de Rio Tinto.



Fonte: G1 (2025).

Outro problema recorrente acontece no Rio Tinto (rio de mesmo nome que a cidade), objeto do trabalho, que durante períodos de chuvas intensas, inunda a rodovia PB-041, principal via que liga o município aos territórios de Marcação e Baía da Traição, em razão do estrangulamento do rio no trecho em que cruza a estrada (Figura 3).

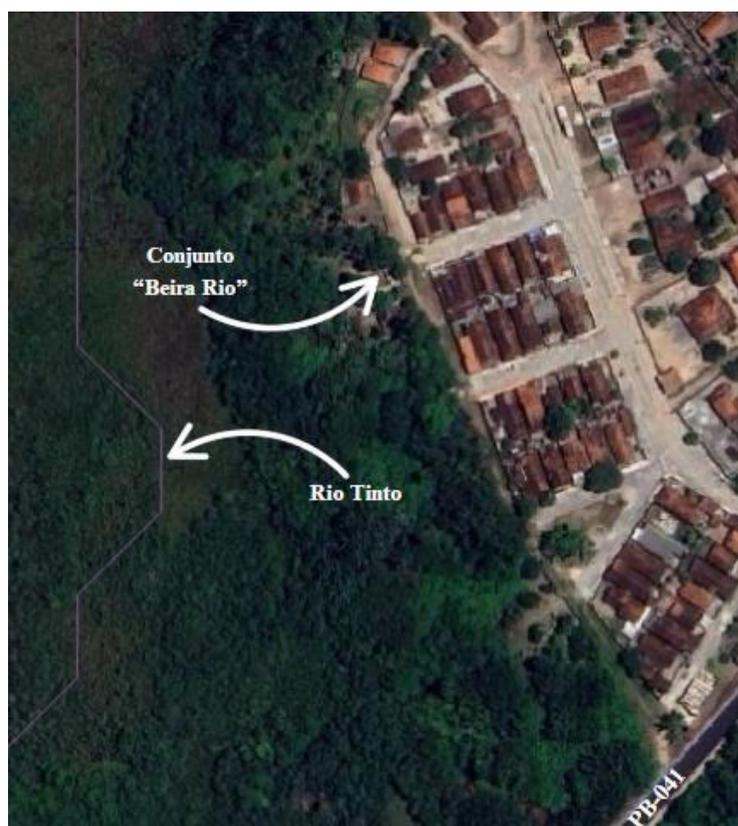
Figura 3: Inundação na rodovia PB-041.



Fonte: G1 (2022).

Além disso, ainda que bairros consolidados próximos a esse rio (como o conjunto Beira Rio) não tenham registrado inundações até o momento, as mudanças climáticas e o aumento da frequência de eventos extremos tornam essas áreas cada vez mais vulneráveis (Figura 4).

Figura 4: Conjunto Beira Rio (Rio Tinto).



Fonte: Google Earth (2025).

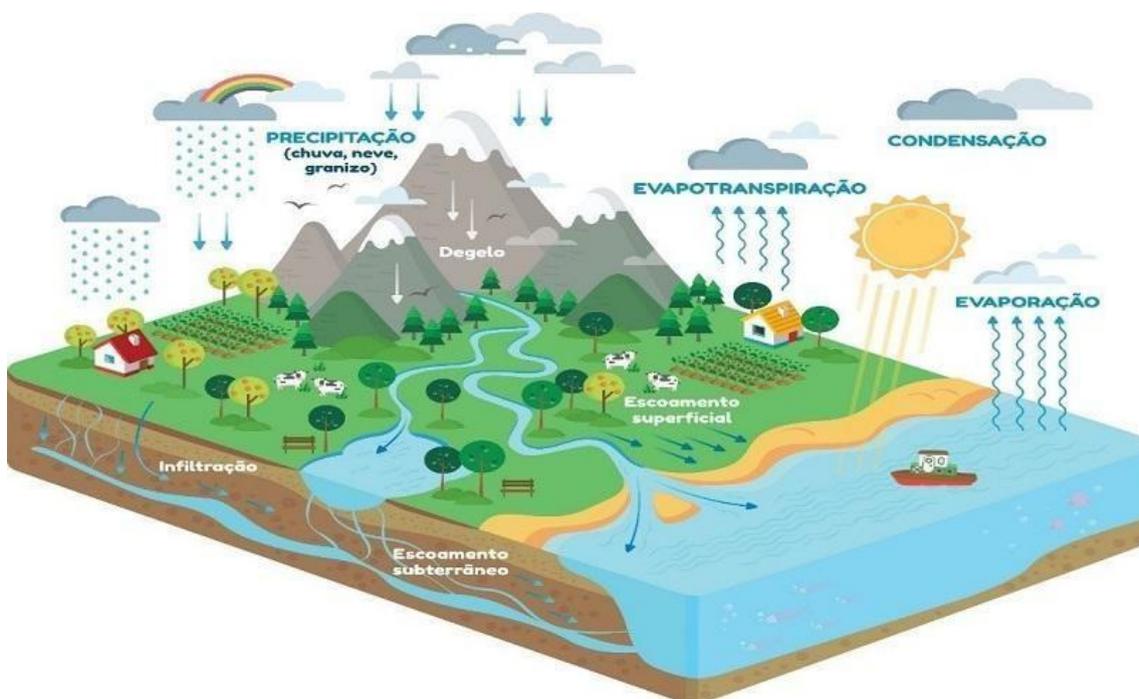
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. IMPACTOS DO USO DO SOLO NO CICLO HIDROLÓGICO

O ciclo hidrológico (Figura 5) consiste no movimento contínuo da água entre os diferentes elementos do planeta como a atmosfera, oceanos, corpos hídricos continentais e superfícies terrestres, mantendo seu balanço hídrico, apesar das transições entre os estados líquido, sólido e gasoso (Rocha et al., 2005). De acordo com Tundisi (2003), os principais processos que regem esse ciclo incluem a evapotranspiração, precipitação, interceptação,

infiltração e escoamento superficial. Portanto, a interação equilibrada entre esses mecanismos é essencial para a manutenção do ciclo hidrológico.

Figura 5: Representação do ciclo hidrológico.



Fonte: Grupo Águas de Portugal (2025).

Entretanto, apesar de sua capacidade de autorregulação, a ocupação humana desordenada altera esse equilíbrio natural do ciclo hidrológico. As modificações antrópicas no uso do solo, como a impermeabilização de áreas urbanas, o desmatamento, a agropecuária intensiva e pastagem sem a devida conservação do solo, perturbam os fluxos naturais da água, gerando impactos ambientais frequentemente irreversíveis, com consequências tanto para os ecossistemas quanto para a sociedade (Tucci, 2003).

Esses efeitos são intensificados pelo constante crescimento populacional, que impulsiona processos de urbanização não planejada, alterando as interações naturais entre os componentes do ciclo hidrológico, como a infiltração e o escoamento superficial.

Desde a primeira operação censitária no Brasil, o país aumentou sua população em mais de 20 vezes, com cerca de 87% dos habitantes concentrados em zonas urbanas (IBGE, 2022). O processo de urbanização compreende a expansão e desenvolvimento dos núcleos urbanos,

envolvendo a construção de infraestrutura residencial e comercial; a implantação de sistemas viários pavimentados, dentre outros. Contudo, a urbanização acelerada e o uso desordenado do solo comprometem as condições necessárias para um desenvolvimento sustentável dessas estruturas urbanas, podendo provocar a incapacidade de gerir os impactos causados pelas aglomerações populacionais (Cabral e Cândido, 2019).

Em complemento, Silva (2015) destaca que as cidades brasileiras não estavam preparadas para um crescimento populacional tão rápido, por isso, acumularam, a partir de então, problemas de todas as ordens. Como consequência, eleva-se a vulnerabilidade da população frente aos desastres ambientais, especialmente devido à impermeabilização do solo, que reduz a infiltração da água, intensifica o escoamento superficial e pode ocasionar eventos como inundações.

Segundo Amaral e Ribeiro (2009), os principais condicionantes antrópicos das inundações incluem: (i) o uso e a ocupação irregular das planícies e margens de cursos d'água; (ii) a disposição inadequada de resíduos sólidos próximos aos corpos hídricos; (iii) as modificações nas características da bacia hidrográfica e dos cursos d'água, como alterações na vazão, retificação e canalização, além da impermeabilização do solo; e (iv) o intenso processo de erosão e assoreamento dos cursos d'água.

2.2. INUNDAÇÕES

Embora os termos inundação, enchente, alagamento e enxurrada, termos conhecidos pelos seus efeitos (e geralmente relacionados a eventos de fortes chuvas) sejam frequentemente utilizados como sinônimos, cada um possui um conceito específico e descreve um fenômeno.

A inundação é o processo em que ocorre a submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água, abrangendo zonas que normalmente não se encontram submersas. Esse transbordamento tende a ocorrer de forma gradual em áreas de planície, sendo geralmente provocado por chuvas bem distribuídas e pelo elevado volume acumulado na bacia de contribuição (CEMADEN, 2021). Essas áreas, conhecidas como zonas de inundação, são frequentemente localizadas próximas aos rios e são temporariamente ocupadas pelo extravasamento das águas (KOBİYAMA et al., 2006).

Quanto às enchentes (ou cheias), o Ministério da Saúde (2025) as define como o fenômeno em que a água sobe temporariamente em um rio ou canal devido ao aumento do fluxo, alcançando seu ponto máximo sem, no entanto, transbordar. E segundo Tucci (2007) esses eventos podem ser ocasionados devido ao comportamento natural dos rios ou ampliados pelo efeito de alteração produzida pelo homem na urbanização, tais com a impermeabilização das superfícies e canalização de córregos.

Ainda em relação aos conceitos, Amaral e Moni (2020), definem como alagamento um fenômeno caracterizado pelo acúmulo localizado de águas pluviais em áreas urbanas, resultante de deficiências no sistema de drenagem, sem relação direta com a dinâmica dos rios, como já ocorreu no município de João Pessoa (Figura 6). E por fim, enxurradas como um grande volume de água que escoam em alta velocidade, ocorrendo em áreas de maior inclinação que podem ou não estar associadas a cursos de água.

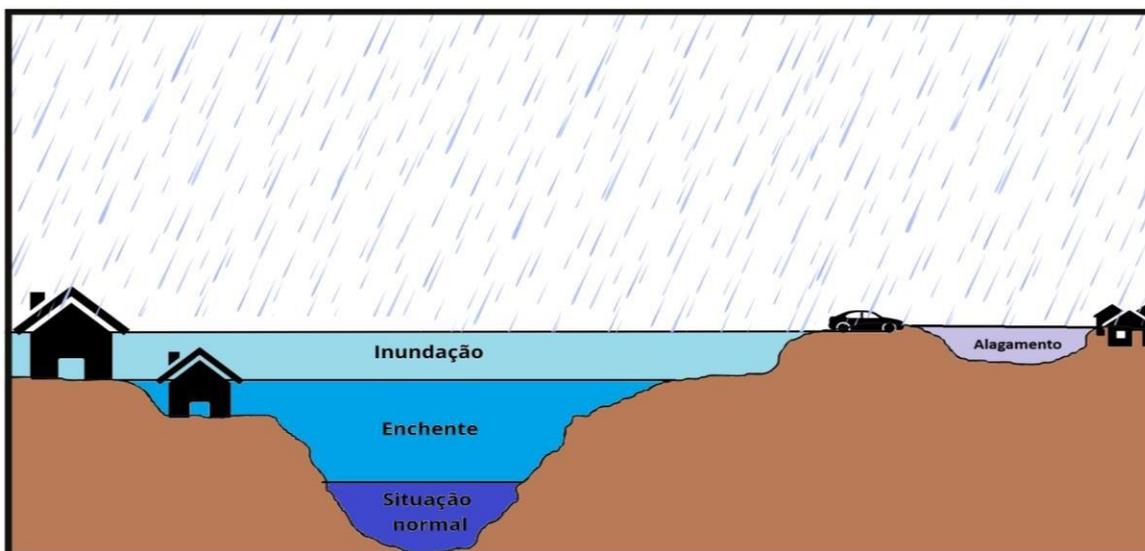
Figura 6: Alagamento no município de João Pessoa- PB.



Fonte: G1 (2025).

A partir das definições de cada fenômeno é possível observar suas diferenças conceituais. Na Figura 7 observa-se também a relação desses eventos com as ocupações do solo.

Figura 7: Perfil esquemático do processo de enchente, inundação e alagamento.



Fonte: adaptado do Ministério das Cidades/IPT (2007).

O esquema evidencia como a ocupação humana desordenada em áreas suscetíveis a inundações sem o devido estudo e planejamento, aliada a eventos de chuvas intensas e a falta de estratégias de mitigação, pode resultar em perdas materiais, humanas e ambientais. Além disso, outras intervenções muito recorrentes no Brasil, resultado do crescimento populacional, são as construções de rodovias que alteram o fluxo natural dos rios. Resultado de estudos deficientes, essas obras frequentemente desconsideram a compatibilidade dessa intervenção com o meio, fato que pode provocar inundações localizadas.

Segundo Tucci, Porto e Barros (1995) inundações localizadas podem ser provocadas por: (i) estrangulamento da seção do rio devido a aterros e pilares de pontes, estradas, aterros para aproveitamento da área, assoreamento do leito do rio e lixo; (ii) remanso devido a macrodrenagem, rio principal, lago, reservatório ou oceano; (iii) erros de execução e projeto de drenagem de rodovias e avenidas, entre outros. Os autores afirmam que obras de intervenções como adutoras, pontes ou rodovias são, frequentemente, projetadas sem se considerar seu impacto sobre a drenagem.

Paralelo a isso, na bacia hidrográfica do Rio Tinto (área estudada), a principal rodovia da cidade de Rio Tinto (PB-041) cruza o rio, causando um estrangulamento e em eventos fortes de chuva a torna frequentemente intransitável. Além disso, a ocupação antrópica próximas ao leito do curso d'água aliado a eventos de chuvas intensas, aumentam a vulnerabilidade das pessoas que residem nessa área. Portanto, é essencial a realização de intervenções que

minimizem os impactos das inundações e diminuam essa vulnerabilidade associada incluindo medidas não estruturais, como ações para gestão e planejamento da cidade e medidas estruturais, a exemplo das bacias de retenção.

2.3. ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO DE INUNDAÇÕES

2.3.1. Medidas não estruturais

As medidas de controle de inundações podem ser classificadas em estruturais e não estruturais, conforme a abordagem adotada em relação ao rio. As medidas não estruturais são voltadas para a convivência com o rio, incluindo estratégias preventivas, como o zoneamento de áreas suscetíveis a inundações, sistemas de alerta e políticas de seguro (Tucci, Porto e Barros, 1995). Essas medidas buscam minimizar os danos causados por alagamentos e inundações pela introdução de normas, regulamentos e programas que visem, por exemplo, o disciplinamento do uso e ocupação do solo, implementação de sistemas de alerta e a conscientização da população para a manutenção dos dispositivos de drenagem (Canholi, 2014).

As medidas não estruturais necessitam de um maior empenho dos setores governamentais, para que seja viável o desenvolvimento dessas ações ao longo do tempo, mantendo os avanços alcançados e buscando melhorias que tornem a região mais sustentável ambientalmente (Melo, 2007).

As principais medidas não estruturais estão exemplificadas no Quadro 1 e classificadas em três categorias, emergenciais, temporárias e definitivas, conforme Barth (1997).

Quadro 1: Principais medidas não estruturais.

Medidas não estruturais

Emergenciais	Previsão de cheia e plano de procedimentos de evacuação e apoio à população afetada.
Temporárias	<p>Criar e tornar o Manual de Drenagem um modelo dinâmico de como tratar a drenagem da bacia, para o qual foi definido;</p> <p>Regulamentação da ocupação da área de inundação, delimitar por cercas, por obstáculos, se possível naturais; constante divulgação de alertas e avisos para a não-ocupação da área suscetível a desastres, na comunidade, nas escolas e através da mídia local com a aplicação de penas alternativas para infratores;</p> <p>Estudos hidrológicos atualizados da bacia hidrográfica de contribuição e dos efeitos a jusante.</p>
Definitivas	<p>Programa de manutenção e inspeção das estruturas à prova de inundação, juntamente com o acompanhamento do controle da quantidade e da qualidade da água drenada;</p> <p>Adequação das construções ribeirinhas ao convívio de eventuais enchentes e/ou alagamentos;</p> <p>Regulamentação dos loteamentos e códigos de construção;</p> <p>Desocupação de construções existentes em áreas de inundação e relocação de possíveis ocupantes;</p> <p>Política de desenvolvimento adequada ao município, evitando prejuízos da inundação ou alagamento;</p> <p>Educação Ambiental constante e dinâmica.</p>

Fonte: adaptado de Barth (1997).

Essas medidas se destacam por apresentarem custos de implementação menores em comparação às medidas estruturais. No entanto, sua aplicação isolada não é suficiente para garantir a segurança e reduzir a vulnerabilidade, especialmente em áreas que já sofreram com inundações e alagamentos e continuam expostas a riscos devido à ausência de ações para adaptação. Dessa forma, é necessário a combinação entre medidas não estruturais e estruturais para o desenvolvimento de uma solução mitigadora mais completa e eficiente.

2.3.2. Medidas estruturais

Na gestão de risco de desastres ambas as soluções são importantes. Porém, as medidas estruturais tendem a demandar investimentos mais elevados, por se tratar de obras de engenharia. No contexto da área de estudo, a escolha entre essas abordagens deve considerar não apenas a viabilidade técnica e econômica, mas também os impactos ambientais e sociais das intervenções.

Segundo Canholi (2014), as medidas estruturais podem ser divididas em dois tipos: intensiva e extensiva. As medidas intensivas podem ser classificadas em quatro categorias, conforme seu objetivo: (i) aceleração do escoamento, por meio da canalização e obras associadas; (ii) retardamento do fluxo, que envolve a implementação de reservatórios, como bacias de detenção e retenção, além da restauração de calhas naturais; (iii) desvio do escoamento, utilizando túneis de derivação e canais de desvio; e (iv) adoção de ações individuais para tornar as edificações mais resilientes a enchentes.

Por outro lado, as medidas extensivas agem na bacia hidrográfica, modificando as relações entre precipitação e vazão, por meio de medidas físicas direta (Tucci, 1993). Essas medidas englobam pequenos armazenamentos distribuídos ao longo da bacia hidrográfica, recomposição da cobertura vegetal e controle da erosão do solo na bacia de drenagem (Canholi, 2014).

No Quadro 2 estão descritas as principais medidas estruturais (Urban Drainage and Flood Control District, 1992; Urbonas e Stahre, 1993).

Quadro 2: Principais medidas estruturais.

Medidas estruturais

Pavimento poroso	Substituição de pavimentação tradicional por blocos porosos, permitindo infiltração e retenção de material particulado grosso.
Faixas gramadas ou plantadas	Áreas projetadas para receber o escoamento superficial de superfícies impermeáveis, aumentando a infiltração e removendo parte dos sedimentos antes que a água atinja a rede de drenagem.
Valetas gramadas	Estruturas ao longo de ruas e estradas que substituem guias e sarjetas, reduzindo a velocidade do escoamento e aumentando a infiltração. São mais eficazes para chuvas fracas.
Bacias de detenção secas	Estruturas que armazenam temporariamente o escoamento superficial, liberando-o gradualmente para reduzir picos de vazão e promover a remoção de sedimentos e metais.
Bacias de detenção alagadas:	Mantêm uma lâmina d'água permanente na parte inferior, permitindo a retenção e decantação de poluentes, além de controlar o volume de escoamento durante eventos chuvosos.

Fonte: adaptado de Urban Drainage and Flood Control District (1992); Urbonas e Stahre (1993).

Segundo Tucci (1993), as medidas extensivas são na maioria das vezes inviáveis para bacias hidrográficas médias e grandes sendo, geralmente, aplicável para as pequenas bacias hidrográficas. Portanto, considerando o tamanho da bacia hidrográfica do Rio Tinto (cerca de 43 km²), esse fato apenas reforçou a escolha pela implementação de medidas estruturais intensivas como medida de controle de inundação para a área.

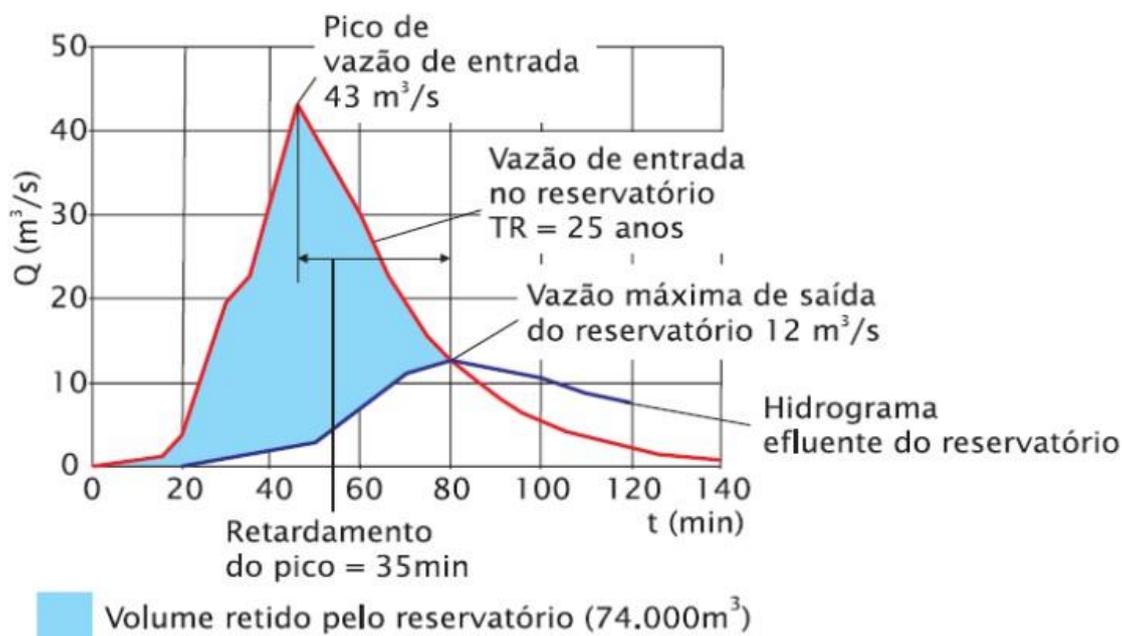
- **Bacias de detenção**

Existem duas tipologias principais de reservatórios: as bacias de detenção e de retenção, ambas medidas estruturais intensivas. E a principal diferença entre elas é a presença de água permanente. As bacias de retenção são projetadas para manter uma lâmina de água permanente na parte inferior e promover a infiltração, sendo indicado para controle da qualidade da água, pois implicam em um longo tempo de permanência. Ao contrário das bacias de detenção que fornecem um armazenamento temporário sendo projeto para permanecer seco entre eventos chuvosos (Nakazone, 2005).

No município de Rio Tinto (onde está localizada a bacia hidrográfica de estudo) todos os cursos d'água têm regime de escoamento intermitente (CPRM, 2005). Ou seja, os rios secam temporariamente durante o período de estiagem. Por essa razão, neste trabalho bacias de detenção serão objeto de estudo no que concerne a sua atuação como estratégia de controle de inundações na bacia hidrográfica do Rio Tinto.

A bacia de detenção é uma estrutura projetada com a finalidade de regular as vazões de escoamento superficial, geradas em uma bacia hidrográfica durante eventos de chuva. Seu principal objetivo não é promover a infiltração da água, mas reter temporariamente o volume escoado (vazão de entrada), liberando-o de forma controlada e em taxas compatíveis com a capacidade da rede de drenagem urbana ou do curso d'água receptor (BAPTISTA, 2005), diminuindo a vazão de pico, conforme mostra Figura 8.

Figura 8: Exemplo de hidrograma com influência de bacias de detenção.



Fonte: Canholi (2014).

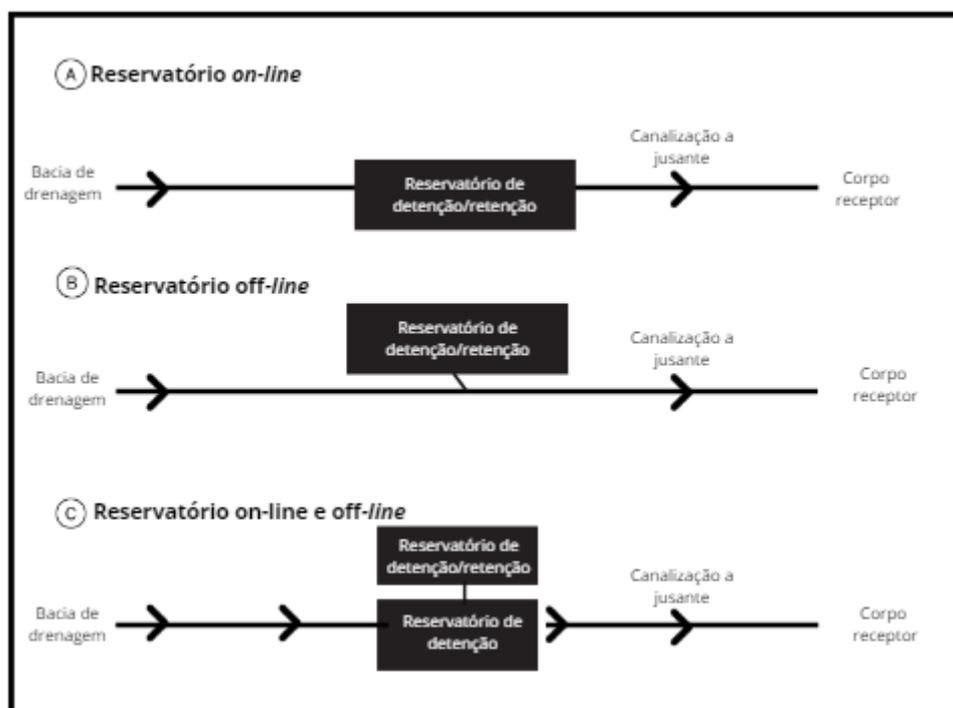
Os grandes reservatórios podem ser “em linha” ou “on-line” quando implantados nas margens dos cursos d’água ou com detenção lateral, com enchimento a partir do transbordamento do leito menor. Os dispositivos também podem ser “off-line” ou “off-stream”, quando implantados em áreas laterais disponíveis. Os reservatórios de detenção podem ser abertos ou fechados, enterrados ou não, a depender dos objetivos, localização e área disponível (Nakazone, 2005).

Os reservatórios *on-line* restituem os escoamentos de forma atenuada e retardada ao sistema de drenagem, de maneira contínua, normalmente por gravidade (Canholi, 2014). A forma exata desses dispositivos pode variar bastante, dependendo de fatores locais, como a capacidade do sistema para escoar a água a jusante, o volume de água a ser armazenado e a quantidade de água que chega ao sistema (Manual de Drenagem Urbana-PR, 2002).

Os reservatórios também podem exercer finalidade múltipla, incluindo o controle da qualidade da água. Ou seja, em um mesmo ponto do sistema, os dois tipos de reservatórios, acoplando um reservatório *off-line* com a finalidade de reter os volumes iniciais do deflúvio, que contém normalmente a maior carga de poluentes, provenientes da lavagem das ruas e edificações, ao reservatório *on-line* (Canholi, 2014).

As diferentes possibilidades de disposição das bacias de detenção podem ser observadas na Figura 9.

Figura 9: Detenção *on-line* e *off-line*.



Fonte: adaptado de Canholi (2014).

Um reservatório de detenção é composto por estruturas de entrada, área de armazenamento, estrutura de descarga e dispositivo de extravasão. As estruturas de entrada podem ser por gravidade, quando se encontram acima da cota de armazenamento dos reservatórios ou por bombeamento (Porto e Filho, 2004).

A área de armazenamento é responsável por conter os volumes e podem ser constituídos dos mais diversos materiais, ou até mesmo no próprio solo, com a criação ou aproveitamento de uma depressão. As estruturas de descarga podem ser também por bombeamento ou gravidade. Esse último caso é condição comum em reservatórios constituídos por meio de barramento ou com lançamento em cotas inferiores à cota de implantação do reservatório (Nakazone, 2005).

As estruturas de descarga são responsáveis por controlar a vazão de saída, o nível de água no reservatório e o volume retido (Oliveira, 2004). Em contrapartida, dispositivos de extravasão são caracterizados por serem elementos de segurança do sistema contra eventos de magnitudes maiores (Nakazone, 2005).

Para o dimensionamento adequado das bacias de retenção e de suas estruturas, é necessário a realização de estudos hidrológicos na bacia hidrográfica de interesse. Entre esses estudos, destaca-se inicialmente o cálculo do tempo de concentração, que auxilia na definição da chuva de projeto, etapa essencial para a transformação da precipitação em vazão, garantindo que as estruturas sejam corretamente dimensionadas.

2.4 ESTUDOS HIDROLÓGICOS

2.4.1 Tempo de concentração

O tempo de concentração é um parâmetro hidrológico definido como o tempo necessário para uma gota d'água se deslocar superficialmente, do ponto mais distante (em percurso hidráulico) da bacia hidrográfica até o seu exutório (McCuen et al., 1984). Esse tempo de resposta é um dos mais utilizados no cálculo de chuvas e hidrogramas de projeto (Silveira, 2005).

Com base nas recomendações de Silveira (2005), diversas fórmulas empíricas podem ser utilizadas para o cálculo do tempo de concentração, sendo algumas mais adequadas para bacias hidrográficas rurais e outras para bacias hidrográficas urbanas.

Conforme demonstrado por Silveira (2005) em estudos comparativos de métodos de estimativa, a equação de Ven Te Chow apresentou o melhor desempenho hidrológico para bacias rurais, particularmente em áreas inferiores a 12,000 km². Considerando que a bacia hidrográfica do Rio Tinto, (1) possui características fisiográficas, predominantemente, rurais; e (2) sua área de drenagem situa-se dentro do intervalo recomendado pelo autor, adotou-se esta fórmula para o cálculo do tempo de concentração.

2.4.2 Chuva de Projeto

Os métodos de estimativa de vazões máximas para construção de obras como bacias de retenção, são aplicados, frequentemente, com eventos de chuvas idealizados, denominados chuvas de projeto, ao qual está associado uma probabilidade (tempo de retorno) de que esse evento venha a ser igualado ou superado em um ano qualquer (Collischonn e Dornelles, 2015).

De acordo com Dorneles et Al. (2019), em geral, as chuvas de projetos são derivadas das relações entre Intensidade-Duração-Frequência (curvas IDF).

A precipitação natural possui grande variabilidade temporal durante um evento chuvoso e de evento para evento. Dessa forma, a variabilidade temporal da precipitação natural dificilmente segue um padrão uniforme identificável. Ou seja, os hietogramas que se sucedem no tempo são diferentes uns dos outros. No caso das chuvas de projeto para a macrodrenagem a recomendação é a utilização do método dos Blocos Alternados para determinar a variabilidade temporal das chuvas outros (Manual de Drenagem Urbana-PR, 2002).

O método dos blocos alternados é de simples aplicação, mas tem como desvantagem o posicionamento do pico da chuva sempre de forma centralizada. Esse método determina o hietograma de projeto a partir das intensidades dadas pela Curva IDF (Manual de Drenagem Urbana-PR, 2002).

De acordo com Tucci, Porto e Barros (1995), o método também assume, de forma implícita, que um evento de chuva com determinada duração e tempo de retorno contém, em seu interior, eventos menores calculados para o mesmo tempo de retorno. Os autores destacam que a probabilidade desses eventos ocorrerem simultaneamente supera, em muito, a probabilidade adotada para o evento de duração mais longa.

A prática de calcular a chuva de projeto baseada nas curvas IDF é usual no que diz respeito ao dimensionamento de estruturas de macrodrenagem, como as bacias de retenção. No entanto, apesar do método dos blocos alternados ser recomendado para a distribuição temporal, a centralização do pico de intensidade pode não representar adequadamente a variabilidade real das chuvas.

Principalmente a crítica apresentada por Tucci, Porto e Barros (1995) reforça a necessidade de cautela na utilização do método, pois o mesmo superestima os volumes gerados pelos eventos de diferentes durações. Ainda assim, devido ao seu uso consolidado, o método será utilizado no desenvolvimento deste trabalho, especialmente no contexto em que dados mais detalhados não estão disponíveis.

2.5 MODELAGEM CHUVA-VAZÃO

2.5.1 Métodos para precipitação efetiva

A precipitação efetiva é a parcela de água da chuva que não infiltra no solo e escoar inicialmente pela sua superfície, posteriormente em cursos de água maiores e mais bem definidos. A chuva excedente é a maior responsável pelas vazões de cheia, principalmente em bacias pequenas e urbanizadas (Tucci, Porto e Barros, 1995).

Fatores como o aumento da impermeabilização do solo causado pelo crescimento da urbanização, estão entre os principais responsáveis pela intensificação da chuva efetiva. Em condições naturais, parte da precipitação infiltra no solo e contribui de maneira atenuada com a vazão no exutório da bacia hidrográfica. No entanto, com a redução da capacidade de infiltração causada pela substituição da vegetação por superfícies impermeáveis, essa parcela da água passa a escoar superficialmente de forma mais rápida. Como consequência, a vazão atinge o exutório de maneira mais intensa e em menor intervalo de tempo.

O cálculo da chuva efetiva é necessário para a transformação da chuva de projeto em vazão. Um dos métodos mais utilizados, especialmente em situações nas quais não se dispõe de dados hidrológicos, é o método do *Soil Conservation Service (SCS)*, atual *Natural Resources Conservation Service (NRCS)*, desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) (Tucci, Porto e Barros, 1995). O Manual de Drenagem Urbana-PR (2002) sugere a utilização desse método para o cálculo da chuva efetiva.

No Brasil, o método do NRCS foi adaptado para as características dos solos do estado de São Paulo, sendo essa adaptação suficientemente abrangente para permitir sua aplicação em solos de outras regiões do país. O método utiliza parâmetros de classificação hidrológica e de cobertura dos solos. Por meio da análise de mais de 3 mil tipos de solos e coberturas de vegetação e plantações, foi estabelecida uma relação empírica que visa correlacionar a capacidade de armazenamento pela bacia hidrográfica a um índice denominado de número curva ou “CN” (na sigla em inglês para *Curve Number*) (Tucci, Porto e Barros, 1995).

Dessa forma, neste trabalho foi adotado o método do NRCS para a estimativa da chuva efetiva utilizada no cálculo da vazão de projeto, dado fundamental para o pré-dimensionamento das estruturas de retenção para a bacia hidrográfica do Rio Tinto.

2.5.2 Modelos Chuva-Vazão

O dimensionamento de estruturas hidráulicas exige um estudo hidrológico detalhado, com o objetivo de determinar as vazões de projeto correspondentes a períodos de retorno determinado, assegurando tanto o funcionamento eficiente quanto a segurança da obra. Para isso, o hidrograma de projeto pode ser obtido por meio de métodos diretos, baseados em dados fluviométricos observados, ou por métodos indiretos, que envolvem o uso de modelos hidrológicos capazes de transformar a chuva de projeto na vazão de projeto (Cunha et al., 2015).

De acordo com Canholi (2014), a ausência ou limitação de dados fluviométricos, somada às dificuldades naturais da execução dessas medições, como a elevada variabilidade de parâmetros em áreas urbanas, incluindo o tipo de solo e o padrão de ocupação do solo, torna necessário o uso de métodos indiretos, denominados sintéticos, para a obtenção dos hidrogramas de projeto. Embora o autor se refira especificamente a bacias hidrográficas urbanas, essa limitação de dados também pode ser observada em bacias hidrográficas rurais, especialmente naquelas onde há ausência de estações de monitoramento ou séries históricas confiáveis.

Nessas situações, para a geração do hidrograma do projeto, aplica-se uma função de transferência, também conhecida como hidrograma unitário, que permite representar a distribuição temporal do escoamento superficial gerado pela chuva efetiva (Cunha et al., 2015).

O Hidrograma Unitário Triangular (HUT), desenvolvido pelo *Soil Conservation Service* (SCS, 1957), atual *Natural Resources Conservation Service* (NRCS), é indicado para bacias hidrográficas com área superior a 4 km² ou quando se busca estimar a variação temporal da vazão e o volume da cheia. Inicialmente proposto para bacias rurais, o método foi adaptado para áreas urbanas e permite estimativas mesmo na ausência de dados observacionais, com base nas características do solo e no uso e ocupação do território (Manual de Drenagem Urbana-PR, 2002).

Esse método utilizado para simular hidrogramas de cheia é um modelo simples. Amplamente utilizado para projetos de hidráulica e hidrologia, por possuir um número de parâmetros reduzidos e as características físicas da bacia hidrográfica se relacionando com tais parâmetros (Tucci, 2005).

De acordo com Cunha et al. (2015), apesar da simplicidade, praticidade e ampla aceitação do método, há diversas críticas quanto à sua generalização. Essas críticas se referem, sobretudo, ao fato de que o método foi desenvolvido com base em experimentos de campo realizados, principalmente, em pequenas bacias hidrográficas rurais da região Centro-Oeste dos Estados Unidos da América. Sendo, posteriormente, aplicado em bacias hidrográficas que, muitas vezes, não apresentam as mesmas características físicas e climáticas. Sendo assim, sua aplicação requer cautela, sendo mais indicado para bacias hidrográficas agrícolas com área inferior a 250 km².

O estudo de Cunha et al. (2015) concluiu que o método do NRCS tende a superestimar o volume escoado, especialmente em eventos de maior magnitude, o que pode resultar no superdimensionamento de obras hidráulicas e no aumento dos custos. A aplicação direta das tabelas do NRCS para definição do CN no cálculo da chuva efetiva, também se mostrou inadequada nessas condições. No trabalho de Cunha et al. (2015) a precipitação efetiva calculada com o método do NRCS é em média 75% superiores aos observados. Diante disso, os autores recomendam o aperfeiçoamento ou substituição do método por abordagens mais recentes, capazes de atender com maior precisão às demandas atuais e reduzir custos decorrentes de projetos superdimensionados.

Apesar das limitações apontadas, optou-se pela utilização do método do NRCS para a transformação chuva-vazão neste estudo, considerando o caráter preliminar da análise, a ampla aceitação do método na literatura consultada e sobretudo, a escassez de dados hidrológicos na bacia hidrográfica do Rio Tinto, o que inviabiliza a aplicação de métodos diretos. Além disso, a área da bacia hidrográfica em estudo encontra-se dentro do intervalo recomendado para a aplicação do Hidrograma Unitário Triangular (entre 4 a 250 km²). Ressalta-se, no entanto, a necessidade de cautela na interpretação dos resultados, considerando as limitações relacionadas à generalização do modelo e o potencial de superestimativa das vazões de pico, conforme demonstrado por Cunha et al. (2015).

2.5.3 Modelagem hidrológica computacional

A aplicação de modelos hidrológicos ou hidráulicos com o objetivo de obter a resposta de uma bacia hidrográfica ou de um sistema de macrodrenagem, a partir de um conjunto de variáveis de entrada, é conhecida como simulação hidrológica-hidráulica. Esse processo

envolve a resolução de sistemas de equações matemáticas, exigindo o uso de ferramentas computacionais para realizar os cálculos de forma eficiente e precisa (Canholi, 2014).

Os avanços na computação, a disponibilidade de instrumentos sofisticados, o uso de mapas digitais e a incorporação do sensoriamento remoto por satélites tornaram os modelos hidrológicos mais completos, permitindo a inclusão de diversas características físicas do sistema. Além disso, esses modelos costumam contar com interfaces simples e acessíveis ao usuário. No entanto, independentemente da complexidade do modelo, sempre existirão incertezas associadas (Singh, V., 2018; Todini, 1988).

Existem uma ampla variedade de *softwares* disponíveis no mercado para simulação de modelos hidrológicos e hidráulicos. A escolha da ferramenta adequada deve considerar critérios como os objetivos do estudo, a complexidade do modelo, a disponibilidade de dados, a interface do usuário e o suporte técnico. Dentre as ferramentas disponíveis para a simulação hidráulico-hidrológica voltada à drenagem urbana, destacam-se as plataformas do *Hydrologic Engineering Center* (HEC), desenvolvidas pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (*U.S. Army Corps of Engineers*), especialmente os módulos HEC-HMS, para modelagem hidrológica e HEC-RAS, para modelagem hidráulica (Canholi, 2014).

De acordo com as definições de Canholi (2014), o HEC-RAS é voltado à modelagem hidráulica unidimensional, permitindo simular regimes de escoamento permanente (uniforme e gradualmente variado) e não permanente. O *software* utiliza a equação de energia e a equação da continuidade para escoamentos permanentes, com cálculo de perdas por atrito via fórmula de Manning, e modela escoamentos variáveis com equações hidrodinâmicas resolvidas por diferenças finitas.

O HEC-HMS, por outro lado, é voltado à modelagem hidrológica, simulando o processo de transformação chuva-vazão em bacias e sub-bacias hidrográficas. Ele estima o escoamento superficial resultante de precipitações em diferentes pontos da rede de drenagem, por meio dos modelos tradicionalmente utilizados em hidrologia para planejamento e projeto em drenagem urbana (Canholi, 2014).

Considerando a finalidade deste trabalho, avaliar o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do Rio Tinto e propor soluções para o controle de inundações com base na estimativa de vazões e no pré-dimensionamento de uma bacia de detenção, o uso do HEC-HMS foi considerado mais adequado para atender a esses propósitos.

2.5.4 Modelagem no HEC HMS

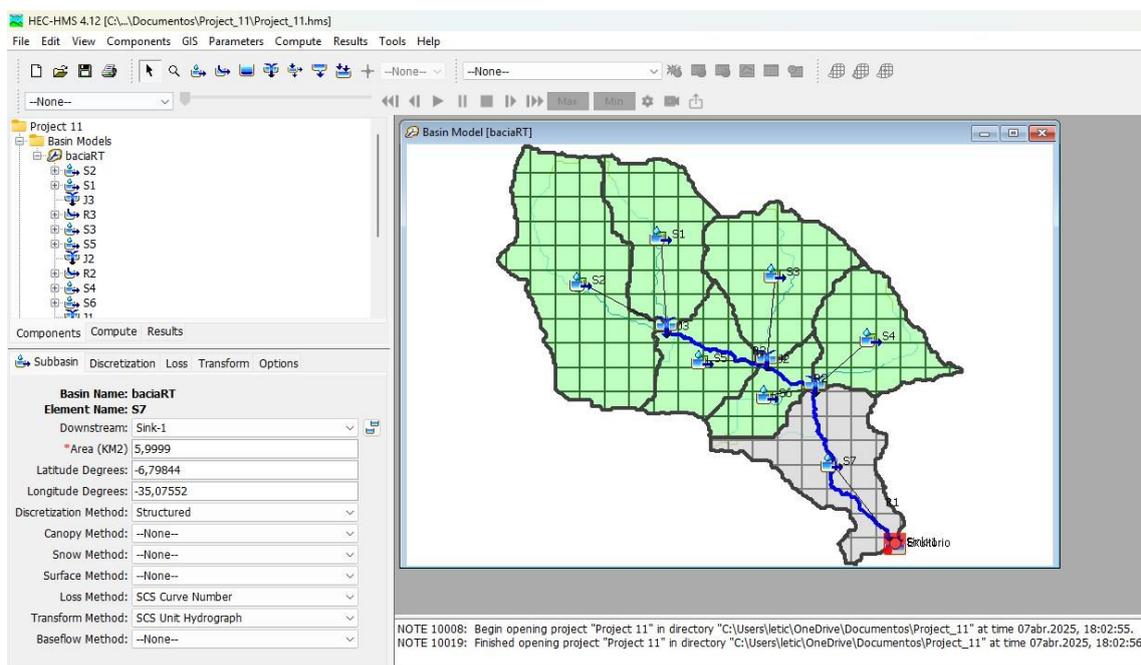
Segundo o USACE (1997), o HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*) é um sistema desenvolvido para simular os principais processos hidrológicos em bacias hidrográficas, como infiltração, geração de hidrogramas e roteamento de fluxo. Além de possibilitar análises baseadas em eventos isolados, o software também permite simulações contínuas, incorporando variáveis como evapotranspiração, umidade do solo e até o derretimento de neve.

Segundo Canholi (2014), o *software* HEC-HMS realiza a transformação chuva-vazão em bacias e sub-bacias hidrográficas, estimando as vazões geradas por uma precipitação em pontos específicos da rede de drenagem. Ele permite simular o escoamento superficial a partir de diversos modelos hidrológicos tradicionais utilizados frequentemente em projetos urbanos. A Figura 10 apresenta a telas de entrada de dados do HEC-HMS.

Dentre as principais funcionalidades descritas por Canholi (2014) estão:

- Entrada de precipitação via hietogramas fornecidos pelo usuário;
- Separação do escoamento com modelos como Green-Ampt, NRCS (*Curve Number*), Horton, Smith-Parlange, entre outros;
- Cálculo do escoamento superficial com hidrogramas unitários de Clark, Snyder ou triangular do NRCS;
- Amortecimento nos canais por meio dos modelos de Muskingum, Muskingum-Cunge, onda cinemática, e Straddle-Stragger;
- Amortecimento em reservatórios a partir de curvas cota-volume e cota-vazão;
- Calibração de parâmetros através de diferentes métodos e funções objetivo, permitindo ajustar vazão de pico, tempo de pico ou volume escoado.

Figura 10: Tela de entrada de dados do HEC-HMS.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

A modelagem de uma bacia hidrográfica no HEC-HMS é feita por meio da representação de seus elementos hidrológicos em uma rede dendrítica, conectando sub-bacias hidrográficas, trechos, junções, reservatórios, desvios, fontes e sumidouros. A computação procede de elementos a montante em uma direção à jusante (USACE, 1997).

Medeiros (2022) realizou um estudo em Recife-PE, onde os alagamentos são frequentes devido à intensa urbanização, o modelo hidrológico HEC-HMS foi utilizado para simular a macrodrenagem do riacho Sítio dos Pintos e do córrego da Fortuna. A partir da delimitação de sub-bacias hidrográficas com o apoio do QGIS e do uso de dados do terreno fornecidos pelo PE3D, foram propostas alternativas de controle de inundações com reservatórios de detenção. Os resultados demonstraram expressivas reduções nos picos de vazão, chegando a quase 70% no Sítio dos Pintos e mais de 72% no Córrego da Fortuna.

Com base nas funcionalidades apresentadas e nos resultados obtidos em estudos práticos, como o de Medeiros (2022), constata-se que o HEC-HMS se configura como uma ferramenta eficaz para a simulação hidrológica de bacias hidrográficas. Sua capacidade de representar os processos de transformação chuva-vazão, associada à flexibilidade na escolha

dos métodos que serão utilizados na modelagem, torna-o especialmente útil no planejamento de intervenções voltadas à redução de inundações, como as bacias de retenção.

3. METODOLOGIA

3.1 DELIMITAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA

Para delimitar a bacia hidrográfica do Rio Tinto, utilizou-se o *software* QGIS (versão 3.28 Firender), que permite a edição de dados geoespaciais, e o Modelo Digital de Terreno (MDT) gerado a partir do FABDEM (*Forest And Buildings removed Copernicus DEM*), com resolução espacial de 30 metros por 30 metros.

Após a inserção do MDT no QGIS, foi utilizada a extensão *WhiteboxTools* para delimitar a área de estudo. O primeiro passo foi o preenchimento de depressões com a ferramenta *BreachDepressions*, garantindo que o escoamento fosse corretamente direcionado até a foz. Em seguida, calculou-se as direções do fluxo com o *D8pointer* e *D8FlowAccumulation*, que permitiu a extração do *raster* da rede de drenagem por meio da ferramenta *ExtractStreams*, que posteriormente foi convertida para vetor aplicando a ferramenta *RasterStreamToVector*. Por fim, com a identificação do ponto escolhido para o exutório da bacia hidrográfica, a delimitação foi realizada utilizando a ferramenta *Watershed*.

3.2 PRÉ-PROCESSAMENTO DA BACIA HIDROGRÁFICA NO HEC-HMS

3.2.1 Discretização da bacia hidrográfica

A discretização da bacia hidrográfica do Rio Tinto em sub-bacias hidrográficas é uma etapa importante, pois possibilita representar com maior fidelidade as particularidades de cada unidade da área de estudo, considerando diferenças como o uso e ocupação do solo e relevo. Essa abordagem permite, principalmente, a identificação de áreas com maior potencial de geração de escoamento, auxiliando dessa forma na proposição de medidas para o controle de inundações.

No HEC-HMS, a partir de um MDT georreferenciado, é possível gerar automaticamente a topologia da bacia hidrográfica. Após a criação do projeto e definição do sistema de coordenadas, o MDT é inserido, permitindo ao *software* realizar as análises topográficas necessárias a partir da etapa de pré-processamento.

O pré-processamento da bacia hidrográfica é realizado por meio da ferramenta GIS (*Geographic Information System*) integrada ao HEC-HMS. Essa etapa começa com o preenchimento das depressões (ou falhas) no terreno, permitindo que o escoamento superficial siga seu curso natural, desde os pontos mais elevados até a foz. Em seguida, o *software* gera automaticamente os arquivos de direção de fluxo, fluxo acumulado e identifica a rede de drenagem principal.

Ainda utilizando a ferramenta GIS, é feita a definição da foz da bacia hidrográfica (exutório), e com base nas informações topográficas e de rede de drenagem, o HEC-HMS realiza a delimitação automática das sub-bacias hidrográficas e o cálculo de diversos elementos associados que foram utilizados no decorrer das simulações.

3.3 PARÂMETROS HIDROLÓGICOS

3.3.1 Tempo de concentração

- Tempo de concentração geral da bacia hidrográfica

Para determinar o tempo de concentração geral da bacia hidrográfica, para estimar a duração da chuva, foi utilizada a equação de Ven te Chow (Equação 1).

$$T_c = 0,160L^{0,64}S^{-0,32} \quad (1)$$

Em que:

T_c – Tempo de concentração (h);

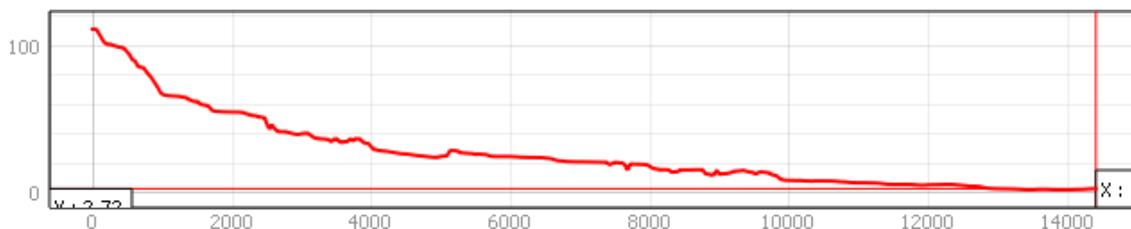
L – Comprimento do rio principal (km);

S – Declividade do rio principal (m/m).

Portanto, primeiramente foi necessário calcular o comprimento do rio principal da bacia hidrográfica a partir do seu perfil longitudinal. Para isso, foi utilizada a extensão *Profile Tool* no QGIS, em conjunto com o MDT e o vetor do rio principal, obtido na etapa de delimitação

da bacia hidrográfica. O perfil longitudinal do Rio Tinto resultante dessa análise está apresentado na Figura 11.

Figura 11: Perfil longitudinal do rio principal da bacia hidrográfica (Rio Tinto).

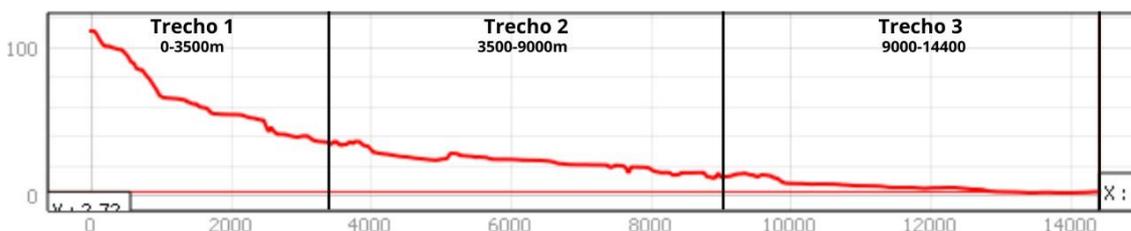


Fonte: elaborado pela autora, 2025

A declividade do rio principal (Rio Tinto) foi determinada a partir da segmentação do curso d'água em três trechos considerados com características parecidas. Em seguida, foi aplicada a média ponderada para calcular a declividade representativa do rio.

Os trechos podem ser observados na Figura 12, sendo Trecho 1 caracterizado pela área mais íngreme, Trecho 2 com declividade moderada e o Trecho 3 com menor declividade.

Figura 12: Trechos utilizados para cálculo da declividade do rio.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

- Tempo de concentração das sub-bacias hidrográficas

O tempo de concentração das sub-bacias hidrográficas foi calculado individualmente para estimar com maior precisão a geração de escoamento superficial no *software* HEC-HMS e o hidrograma resultante de cada sub-bacia hidrográfica. Essa abordagem permite considerar as particularidades de cada sub-bacia hidrográfica e sua influência no hidrograma do exutório.

Para a determinação dos tempos de concentração das sub-bacias hidrográficas delimitadas no HEC-HMS, também foi utilizada a equação de Ven te Chow (Equação 1), pelas mesmas razões pelo qual foi empregada no cálculo do tempo de concentração geral da bacia hidrográfica.

Os parâmetros necessários para o cálculo do tempo de concentração - comprimento e declividade do curso d'água principal - foram obtidos pelo processamento do MDT, integrado ao modelo hidrológico da bacia hidrográfica no HEC-HMS.

3.3.2 Tempo de retorno

No que concerne a obras de engenharia, a segurança e durabilidade frequentemente se associam a um espaço de tempo em anos (tempo de retorno) onde, provavelmente ocorrerá um fenômeno de grande magnitude (DNIT, 2005), como por exemplo um evento de chuva.

O tempo de retorno depende das características do projeto e dos potenciais prejuízos que traria uma eventual falha, em que a vazão superasse a utilizada no dimensionamento. Portanto, caso os prejuízos sejam elevados, deve-se adotar um período de retorno alto, caso contrário, o tempo de retorno pode diminuir conforme o risco (Collischonn e Dornelles, 2015).

Para obras de macrodrenagem, como bacias de retenção, adota-se valores mais altos se comparados com obras de microdrenagem. Um estudo realizado para a cidade de São Paulo estabeleceu uma relação entre o tipo de estrutura e o tempo de retorno recomendado (Collischonn e Dornelles, 2015). Com base nesse estudo, adotou-se um período de retorno de 30 anos para o cálculo da chuva de projeto.

3.3.3 Chuva de projeto

Os métodos de estimativa de vazões máximas para construção de obras como bacias de retenção, são aplicados frequentemente com eventos de chuvas idealizados, denominados chuvas de projeto. as quais estão associadas uma probabilidade (tempo de retorno) de que esses eventos venham a ser igualado ou superado em um ano qualquer (Collischonn e Dornelles, 2015).

As chuvas de projeto são normalmente obtidas a partir de curvas que relacionam a intensidade, a duração e frequência das chuvas, chamadas curvas IDF (Collischonn e Dornelles, 2015).

A relação entre Intensidade-Duração-Frequência (IDF) é geralmente representada pela Equação 2 (Aragão et al., 2013).

$$i = \frac{k \cdot Tr^m}{(d+B)^n} \quad (2)$$

Onde:

i – Intensidade ($mm \cdot h^{-1}$);

Tr – Tempo de retorno (ano);

d – Duração da chuva (minutos); e,

k, m, B e n – Parâmetros empíricos da equação.

Para o cálculo da chuva de projeto da bacia hidrográfica do Rio Tinto utilizou-se os parâmetros otimizados por Ricardo de Aragão et al. (2024). Esses parâmetros para a cidade de Rio Tinto podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros otimizados da curva IDF para a cidade de Rio Tinto (PB).

K	m	B	n
1335,12	0,166	12,53	0,78

Fonte: adaptado de Ricardo de Aragão et al. (2025).

Após a definição dos parâmetros da curva IDF para a área de estudo foi necessário definir demais características da chuva de projeto, são elas: a duração da chuva; a intensidade média, obtida com base na curva IDF; e a distribuição temporal (Collischonn e Dornelles, 2015).

A duração da chuva de projeto é determinada de modo a assegurar que toda a bacia hidrográfica contribua, simultaneamente, para o escoamento que atinge o exutório, ponto

selecionado para a estimativa da vazão máxima (Collischonn e Dornelles, 2015). Portanto, a duração da chuva do seguinte projeto corresponde ao tempo necessário para que toda a bacia hidrográfica contribua com o escoamento no exutório, ou seja, o tempo de concentração que foi calculado anteriormente.

No que concerne à distribuição da chuva, para o desenvolvimento dos hietogramas, foi utilizado o método dos blocos alternados. Esse método é proposto pelo Manual de Drenagem Urbana-PR (2002), utiliza os dados das relações intensidade-duração-frequência e é caracterizado pela distribuição de totais de chuva em intervalos de tempo contidos na duração total. O método segue as etapas descritas por Tucci, Porto e Barros (1995):

- seleciona-se a duração da chuva (d) e o intervalo de discretização (Δt);
- por meio da curva IDF, obtém-se a intensidade de chuva para cada duração;
- as intensidades são transformadas em alturas de chuva e acumuladas até o último intervalo de tempo;
- calculam-se os incrementos dos totais acumulados;
- os incrementos ou blocos obtidos são rearranjados numa sequência tal que, no centro da duração da chuva, situe-se o bloco maior e, em seguida, os demais blocos são dispostos em ordem decrescente, um à direita e o outro à esquerda do bloco maior, alternadamente.

De acordo com Canholi (2014), a definição do intervalo de tempo (Δt) é arbitrária, e valores menores tendem a aumentar as intensidades de pico do escoamento. Collischonn e Dornelles (2015) recomendam que a discretização temporal da chuva deve ser igual ou menor a 1/10 do tempo de concentração da bacia hidrográfica em estudo. Considerando a característica de arbitrariedade na definição do Δt , optou-se por um intervalo de 10 minutos, com o objetivo de melhorar a resolução temporal da chuva e evitar a concentração de volumes intensos em um único bloco, ainda que esse valor não corresponda a 1/10 do tempo de concentração da bacia hidrográfica.

Após o cálculo da chuva de projeto, os valores obtidos são inseridos no *software* HEC-HMS como dados de entrada para o cálculo da chuva efetiva e, em seguida, vazão de projeto.

i. *Curve Number*

A chuva de projeto calculada para a bacia hidrográfica não se converte integralmente em escoamento superficial. Para estimar a parcela que efetivamente contribui para o escoamento no exutório, é necessário calcular a chuva efetiva.

A relação funcional mais empregada para estimar o escoamento superficial em bacias hidrográficas não monitoradas é o Método *Curve Number*, desenvolvido pelo NRCS. O *Curve Number* é um índice que representa a combinação empírica de três fatores: grupo de solo, cobertura do solo e as condições de umidade do solo (McCuen, 1998).

De acordo com Canholi (2014), o método analisou diversos tipos de solos e coberturas de vegetação e plantações, e por meio disso estabeleceu uma relação empírica que visa correlacionar a capacidade de armazenamento da bacia hidrográfica ao índice CN.

A correlação para a estimativa do CN é a seguinte:

$$S = \frac{25.400 - 254CN}{CN} \quad (3)$$

onde:

S - armazenamento máximo (mm);

CN - número de curva (*Curve Number*) (≤ 100) (quando o número de curva é igual a 100, o armazenamento é nulo).

Para a estimativa CN, é necessário consultar os valores tabelados que consideram o tipo de solo e a ocupação da área em estudo. No caso de áreas permeáveis, os valores de CN variam conforme o grupo hidrológico do solo (A, B, C ou D) e o tipo de cobertura vegetal ou uso do solo, como em áreas urbanas residenciais, comerciais ou industriais.

As definições dos grupos hidrológicos de solo, conforme estabelecidas pelo NRCS, são descritas por Mockus (1972) com base nas características de infiltração e no potencial de escoamento superficial e podem ser consultadas na Quadro 3.

Quadro 3: Grupos hidrológicos de solo.

Tipos de solo

Grupo A

Compreende os solos com baixo potencial de escoamento e alta taxa de infiltração uniforme quando completamente molhados, consistindo, principalmente de areias ou cascalhos, ambos profundos e excessivamente drenados. Taxa mínima de infiltração: $> 7,62$ mm/h (TR-55, 1986).

Grupo B

Compreende os solos contendo moderada taxa de infiltração quando completamente molhados, consistindo, principalmente de solos moderadamente profundos a profundos, moderadamente a bem drenados, com textura moderadamente fina a moderadamente grossa. Taxa mínima de infiltração: 3,81-7,62 mm/h (TR-55, 1986).

Grupo C

Compreende os solos contendo baixa taxa de infiltração quando completamente molhados, principalmente com camadas que dificultam o movimento da água através das camadas superiores para as inferiores, ou com textura moderadamente fina e baixa taxa de infiltração. Taxa mínima de infiltração: 1,27-3,81 mm/h (TR-55, 1986).

Grupo D

Compreende os solos que possuem alto potencial de escoamento, tendo uma taxa de infiltração muito baixa quando completamente molhados, principalmente solos argilosos com alto potencial de expansão. Pertencem a este grupo, solos com grande permanência de lençol freático elevado, solos com argila dura ou camadas de argila próxima da superfície e solos expansivos agindo como materiais impermeabilizantes próximos da superfície. Taxa mínima de infiltração: $< 1,27$ mm/h (TR-55, 1986).

Fonte: Mockus (1972).

Segundo Tucci, Porto e Barros (1995), o método do NRCS ainda distingue três condições de umidade antecedente do solo que serão necessários para a definição do CN:

CONDIÇÃO I - solos secos: as chuvas, nos últimos cinco dias, não ultrapassaram 15 mm;

CONDIÇÃO II - situação média na época das cheias: as chuvas, nos últimos cinco dias totalizaram de 15 a 40 mm;

CONDIÇÃO III - solo úmido (próximo da saturação): as chuvas, nos últimos cinco dias, foram superiores a 40 mm, e as condições meteorológicas foram desfavoráveis a altas taxas de evaporação.

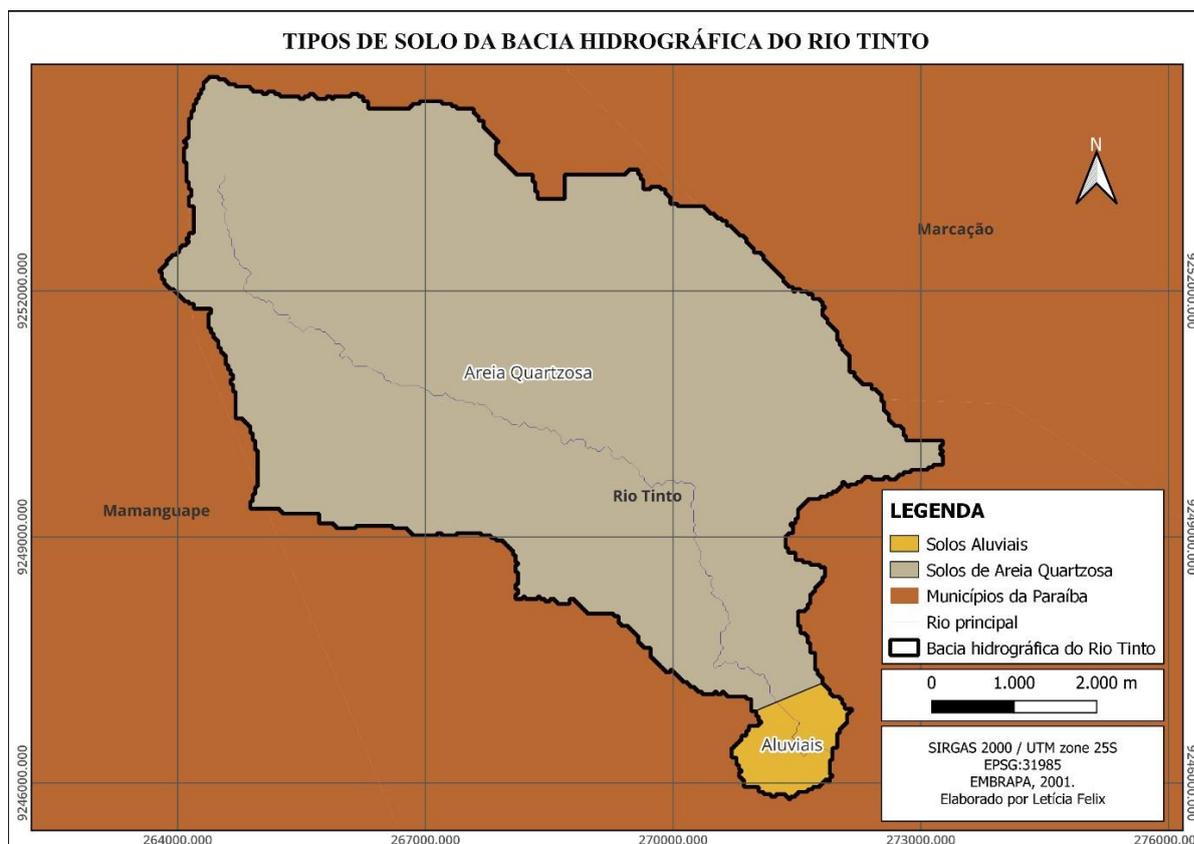
Para a bacia hidrográfica do Rio Tinto, adotou-se a Condição II de umidade antecedente, por representar um estado intermediário de saturação do solo. Essa escolha também visou evitar a superestimação da chuva efetiva que, conseqüentemente, pode elevar os custos de infraestrutura, conforme já apontado no estudo de Cunha et al. (2015).

A partir da definição da condição de umidade, procedeu-se com a estimativa do CN para a área de estudo. Como as bacias hidrográficas são compostas por sub-bacias hidrográficas com diferentes características hidrológicas, seguiu-se a recomendação de Canholi (2014) de adotar uma média ponderada dos valores de CN com base na proporção de cada tipo de uso do solo e tipo de solo.

Nesse contexto, optou-se por calcular o CN individualmente para cada sub-bacia hidrográfica, com o objetivo de obter uma estimativa mais precisa da chuva efetiva, considerando as especificidades do uso e ocupação do solo em cada unidade. A adoção de um valor médio único de CN para toda a bacia hidrográfica resultaria na perda dessas particularidades, que comprometeria a representatividade da modelagem hidrológica.

Para a determinação dos valores de CN na bacia hidrográfica do Rio Tinto, foram utilizados dados referentes aos tipos de solo fornecidos pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (EMBRAPA, 2001). A Figura 13 apresenta a distribuição dos tipos de solo na área de estudo.

Figura 13: Tipos de solo da bacia hidrográfica do Rio Tinto.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Na Figura 13 é possível observar que o tipo de solo predominante na bacia hidrográfica é a areia quartzosa, pertencente ao grupo dos Neossolos Quartzarênicos. De acordo com o estudo realizado por Sartori et al. (2005) esse tipo de solo se enquadra no Grupo Hidrológico B e é caracterizado por apresentar uma taxa de infiltração moderada, além de resistência e tolerância à erosão também moderadas. Já os solos aluviais, que representam uma pequena parcela da área da bacia hidrográfica, são classificados como Neossolos Flúvicos e pertencem ao Grupo Hidrológico C. Esses solos possuem baixa taxa de infiltração, além de baixa resistência e tolerância à erosão.

Neste trabalho adotou-se, para o cálculo do CN, apenas a classificação do solo correspondente ao Grupo Hidrológico B, devido à predominância de solos do tipo areia quartzosa, que representam cerca de 97% da área da bacia hidrográfica. A pequena parcela de solos aluviais do Grupo C, próxima ao exutório, possui influência limitada, que justifica a simplificação sem comprometer expressivamente a qualidade dos resultados na modelagem hidrológica realizada no HEC-HMS.

Para determinar o CN também foi realizada a classificação do uso e ocupação do solo, por meio de imagens obtidas a partir do satélite Sentinel 2 (nível L2A), do programa Copernicus com resolução espacial de 10 metros por 10 metros. A classificação foi realizada utilizando a ferramenta *Dzetsaka*, disponível no *software* QGIS, aplicando o método de classificação supervisionada.

Esse método se caracteriza por exigir a seleção prévia de amostras representativas de cada classe de uso e cobertura do solo, denominadas "treinamento", que orientam o *algoritmo* na identificação dos padrões presentes na imagem, rotulando os *pixels* de acordo com as classes estabelecidas, gerando, desta forma, um mapa de uso do solo.

Seguindo a metodologia proposta por Tucci, Porto e Barros (1995), inicialmente foi definida a condição de umidade antecedente do solo; em seguida, realizou-se a classificação do solo da área de estudo de acordo com os grupos hidrológicos estabelecidos pelo NRCS; e a classificação por uso e ocupação do solo. Por fim, foram selecionados os valores do CN correspondentes a essas características, com base na Tabela 2, conforme indicado pelo autor.

Tabela 2: Valores de número de curva (CN) para condição II de umidade.

Condição de umidade II	
Uso do solo	CN
1 Floresta	60
3 Solo exposto	79
4 Campo/formação campestre	58
2 Área urbana	85
5 Nuvem	79

Fonte: adaptado Tucci, Porto e Barros (1995).

Com os valores de CN associados a cada classe de uso e ocupação do solo sob a condição de umidade e de tipo de solo estabelecida, foi realizada a quantificação da área correspondente a cada classe pra cada sub-bacia hidrográfica. Esse processo foi realizado no *software* QGIS, por meio da ferramenta *GRASS GIS Provider*, que possibilitou a contagem dos *pixels* representativos de cada categoria de uso do solo, previamente definidos na classificação supervisionada. A partir dessas informações, foi possível calcular o CN médio de cada sub-bacia hidrográfica utilizando uma média ponderada com base na área de cada classe.

3.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA NO HEC-HMS

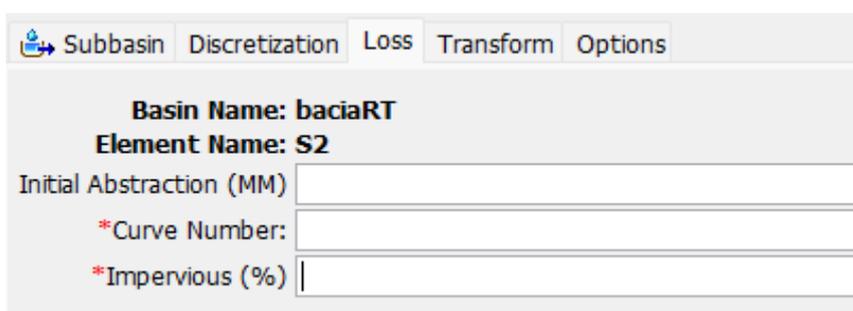
3.4.1. Vazão de projeto

Para iniciar a modelagem hidrológica, foi primeiramente considerado o cenário 0, que representa a condição atual da bacia hidrográfica, sem qualquer intervenção. Este cenário serviu como base para a simulação dos Cenários 1 e 2, nos quais foram consideradas as bacias de detenção. Para isso, adotou-se o método do NRCS, aplicando a Curva Número (CN) para o cálculo da chuva efetiva e utilizando a metodologia do NRCS para estimar a vazão de projeto.

- Chuva efetiva

Para calcular a vazão de projeto, o primeiro passo foi determinar a chuva efetiva. No HEC-HMS, há diferentes métodos disponíveis para esse cálculo, o escolhido foi o *Curve Number* (CN) do NRCS. Ao selecionar esse método, o *software* realiza os cálculos automaticamente a partir da inserção dos seguintes parâmetros: abstração inicial, valor do CN e porcentagem de área impermeável (considerada como área urbana) pra cada sub-bacia hidrográfica, como mostrado na Figura 14.

Figura 14- Dados requisitados pelo HEC-HMS para cálculo da chuva efetiva



Subbasin Discretization Loss Transform Options

Basin Name: baciaRT
Element Name: S2

Initial Abstraction (MM)

*Curve Number:

*Impervious (%)

Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Segundo Canholi (2014), a fórmula proposta pelo NRCS é:

$$H_{EXC} = \frac{(P-Ia)}{(P-Ia)+S}, \text{ se } P > 0,2S \quad (4)$$

$$H_{EXC} = 0, \text{ se } P < 0,2S$$

Sendo:

H_{EXC} - Precipitação excedente) (mm);

P - precipitação (mm);

Ia - abstração inicial (mm);

S - armazenamento máximo (mm).

A abstração inicial (Ia) diz respeito à água precipitada que é interceptada pela vegetação, retida em depressões do terreno ou infiltrada. No método *Curve Number* (CN), assume-se convencionalmente que essa abstração corresponde a 20% da capacidade de armazenamento máximo do solo (S), ou seja:

$$Ia = 0,2S \quad (5)$$

Dessa forma, o *software* aplica o método *Curve Number* (CN) resolvendo a Equação (4) apenas nos casos em que a precipitação for superior a 0,2S. Para precipitações menores, considera-se que não há escoamento superficial gerado. O valor de S é determinado a partir do *Curve Number* (CN) adotado para a bacia, por meio da relação da Equação 3.

Portanto, ao inserir o CN e os demais parâmetros na interface do HEC-HMS, o próprio programa realiza automaticamente o cálculo da chuva efetiva, distribuída no tempo de acordo com o hietograma adotado, servindo como entrada para o modelo de transformação chuva-vazão.

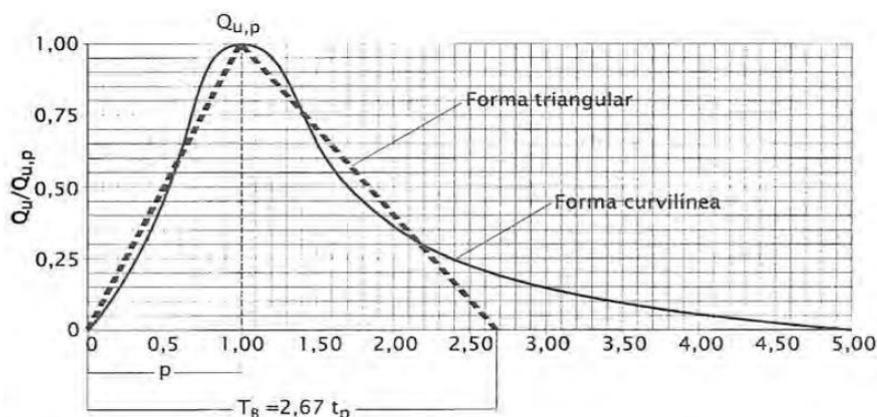
- Método de transformação chuva-vazão

Neste trabalho, para a transformação da chuva em vazão, foi adotado o método do hidrograma unitário do NRCS. O hidrograma unitário proposto pelo NRCS, é uma função que transforma um hietograma de chuva excedente em um hidrograma de projeto. O conceito de hidrograma unitário assume que, em uma bacia hidrográfica ideal que se comporta como um

reservatório linear, chuvas com mesma intensidade e duração geram hidrogramas com pico e duração iguais, variando apenas em magnitude. Assim, ao se conhecer o hidrograma gerado por 1 cm (um) de chuva excedente, é possível estimar o escoamento de outras chuvas por simples proporcionalidade, desde que a duração seja a mesma (Canholi, 2014).

Sua forma curvilínea representa a média de diversos hidrogramas unitários obtidos de bacias hidrográficas com características distintas (Figura 15), onde Q_u corresponde à vazão por centímetro de chuva excedente ($m^3/(s \cdot cm)$), Q_p é a vazão de pico por centímetro de chuva excedente ($m^3/(s \cdot cm)$) e t_p é o tempo de ocorrência do pico (h). Esse hidrograma adimensional, ou seja, mostra apenas a forma do hidrograma, sem valores absolutos de vazão ou tempo, pode ser transformado em um hidrograma unitário com a duração desejada, desde que sejam conhecidos Q_p e t_p (Canholi, 2014).

Figura 15: Hidrograma adimensional do NRCS - curvilíneo e triangular.



Fonte: Canholi (2014).

O hidrograma total de um evento pode ser construído a partir da soma dos hidrogramas parciais, gerados para cada bloco de chuva excedente (relativo a cada intervalo de tempo Δt), resultando no hidrograma final referente à precipitação analisada. A Equação (6) representa o cálculo do tempo até o pico de vazão (t_p), somando a duração da chuva (D) ao tempo de retardo da bacia (t_L) que, por sua vez, é estimado com base em 60% do tempo de concentração (Equação 7). Já a Equação (8) calcula a vazão de pico ($Q_{u,p}$) com base na área da bacia hidrográfica e no tempo de pico (Canholi, 2014).

$$t_p = \frac{D}{2} + t_L \quad (6)$$

$$t_L = 0,6t_c \quad (7)$$

$$Q_{u,p} = \frac{2,08A_d}{t_p} \quad (8)$$

Onde:

t_p - tempo de ocorrência do pico (h);

D - duração da precipitação excedente (h);

t_L - tempo de retardo (h);

t_c - tempo de concentração (h);

A_d - área de drenagem (km^2)

Para facilitar os cálculos, o hidrograma curvilíneo pode ser simplificado em um hidrograma triangular, com tempo de base (T_B) é calculado pela Equação 9. O volume total continua o mesmo, mas a distribuição da vazão ao longo do tempo é menos realista (Canholi, 2014).

$$T_B = 2,67 t_p \quad (9)$$

Com base nos conceitos apresentados, para a obtenção dos hidrogramas gerados pela chuva de projeto em cada sub-bacia hidrográfica pelo método do NRCS, utilizou-se o *software* HEC-HMS. No *software*, o método tem como objetivo transformar a chuva efetiva em vazão ao longo do tempo, gerando um hidrograma curvilíneo padrão que representa como a água escoou da bacia hidrográfica até o ponto de saída (exutório).

De acordo com o Manual do Usuário do HEC-HMS (2016), no processo de transformação da chuva em vazão, o hidrograma unitário NRCS assume que 37,5% do volume de escoamento ocorre antes do pico de vazão. Essa característica é utilizada para definir o chamado Fator de Vazão de Pico (FVP), que no modelo padrão do NRCS tem valor de 484.

Esse fator incorpora parâmetros como a forma do hidrograma, a duração da chuva e as unidades utilizadas, sendo essencial para calcular corretamente a altura do pico de vazão.

Contudo, sabe-se que o comportamento do escoamento pode variar de acordo com características locais da bacia hidrográfica, como a declividade do terreno, o comprimento do curso d'água e o uso do solo. Por isso, de acordo com o manual do HEC-HMS, o *software* permite ajustar esse fator de pico, o que possibilita simular hidrogramas mais adequados à realidade da bacia hidrográfica estudada. Bacias hidrográficas mais planas tendem a ter um fator menor (até cerca de 100), enquanto bacias hidrográficas mais íngremes podem alcançar valores superiores a 600.

Outro parâmetro importante do método é o tempo de retardo (*lag time*), que representa 60% do tempo de concentração da bacia hidrográfica (Equação 7). Esse valor é essencial para posicionar corretamente o pico do hidrograma no tempo (Manual do Usuário do HEC-HMS, 2016). Os parâmetros requisitados pelo HEC-HMS para cálculo do hidrograma de projeto podem ser observados na Figura 16.

Figura 16: Dados requisitados pelo HEC-HMS para cálculo da vazão de projeto

A imagem mostra uma janela de configuração do HEC-HMS com as seguintes opções:

- Subbasin
- Discretization
- Loss
- Transform
- Options

Basin Name: baciaRT
Element Name: S2
Graph Type: Standard (PRF 484) [seta para baixo]
*Lag Time (MIN) [campo de entrada vazio]

Fonte: elaborado pela autora, 2025.

3.4.2. Pré-dimensionamento das bacias de retenção

O dimensionamento dos reservatórios no HEC-HMS foi realizado utilizando o método *Outflow Structures*, que simula o escoamento por meio de estruturas de controle como orifícios e vertedores de crista larga. Essas estruturas são empregadas em bacias de retenção do tipo *on-*

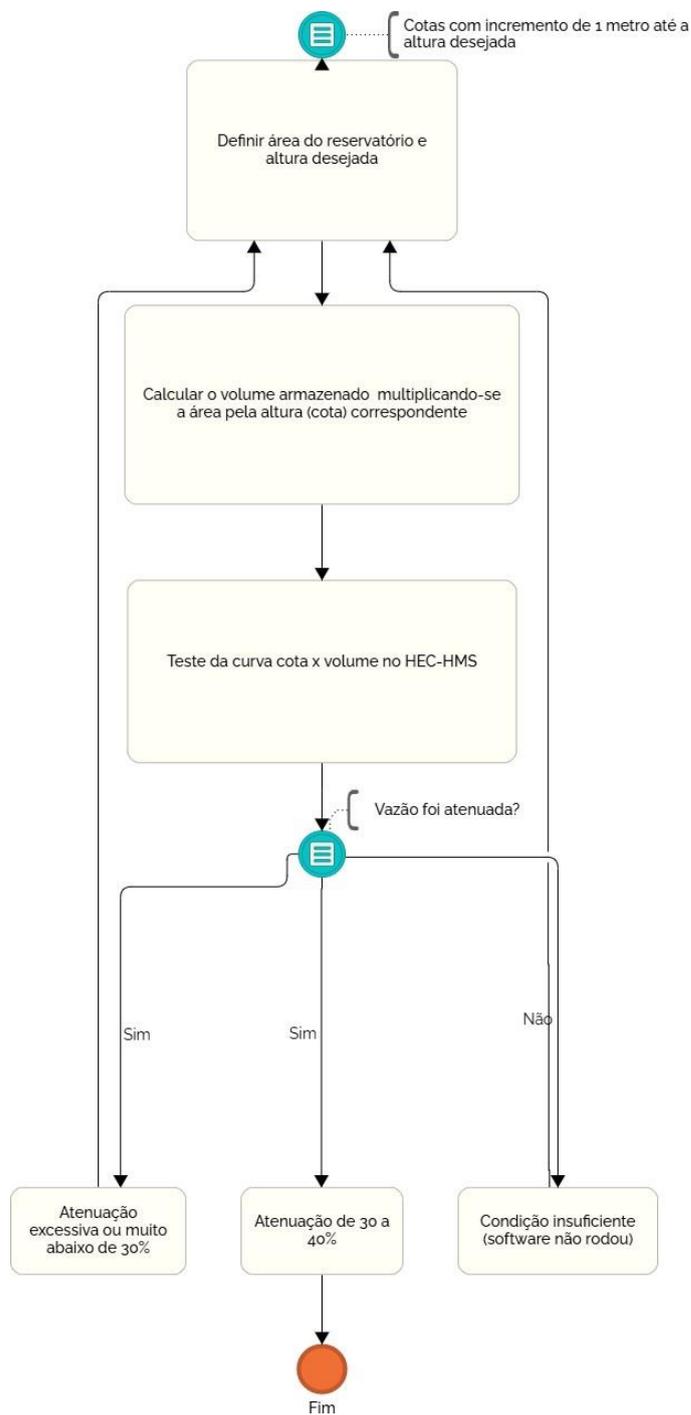
line, sendo comumente combinadas para atender aos diferentes comportamentos desejados do hidrograma efluente. Normalmente, adota-se um orifício de fundo associado a orifícios superiores ou a vertedores livres, além de vertedores de emergência, os quais devem garantir a segurança da bacia de detenção, preferencialmente sem controle por comportas (Canholi, 2014).

No trabalho em questão, foram testadas diferentes configurações para as estruturas de saída, variando-se a posição (cota), área dos orifícios de descarga, dimensões dos vertedores de soleira livre e combinações entre eles, com o objetivo de se obter um desempenho eficiente. Esses testes buscaram alcançar um equilíbrio entre uma atenuação eficiente dos picos de vazão, o dimensionamento adequado do reservatório e a viabilidade técnica e econômica da estrutura, de modo a evitar superdimensionamentos ou o uso excessivo de dispositivos de controle.

Além disso, com o objetivo específico de avaliar a eficácia de medidas de controle de inundações na área de estudo, foram comparados os desempenhos de dois cenários de intervenção simulados no HEC-HMS, tendo como base o cenário 0, que representa a condição atual da bacia sem qualquer tipo de dispositivo. O primeiro cenário avaliou a implantação de uma única bacia de detenção posicionada no ponto de maior contribuição. E o segundo cenário considerou a distribuição de múltiplas bacias de detenção em sub-bacias hidrográficas de cabeceira, com o intuito de reter parte da vazão diretamente nessas zonas. A comparação entre os cenários permitiu avaliar o impacto das diferentes estratégias tanto na atenuação da vazão de pico quanto na redução do volume necessário para o dimensionamento dos reservatórios, em relação à situação de referência (cenário 0).

Como um dos objetivos do trabalho é o pré-dimensionamento e não havia disponível uma curva cota-volume real para a área de estudo, adotou-se uma abordagem iterativa que iniciou com testes de reservatórios com áreas de 100 m x 100 m. Além disso, como não foi possível obter dados sobre a vazão máxima suportada pela estrutura da estrada para fins de comparação, adotou-se como referência um intervalo de 30% a 40% de atenuação da vazão para caracterizar uma redução expressiva. Essa abordagem pode ser observada no fluxograma da Figura 17.

Figura 17: Fluxograma de iteração para simulação do reservatório de detenção.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

No que concerne ao dimensionamento dos orifícios de saída, foram inseridos os seguintes dados no modelo:

- Área do orifício;

- Cota do centro do orifício em relação à base do reservatório;
- Coeficiente de descarga.

Para os vertedores, adotou-se a simulação de vertedores de crista larga, com entrada dos seguintes parâmetros:

- Elevação (cota);
- Comprimento da crista;
- Coeficiente de descarga.

Os coeficientes foram adotados conforme recomendações da literatura. No caso dos orifícios, utilizou-se o valor de 0,6, dentro da faixa entre 0,6 e 0,7 indicada por Tucci, Porto e Barros (1995), e sugerido por Canholi (2014) como valor representativo para esse tipo de estrutura. Para os vertedores de parede espessa, (com borda livre entre 30 e 60 cm acima da cota máxima de projeto), foi adotado o coeficiente de 1,66, valor típico utilizado segundo Tucci, Porto e Barros (1995) que aponta uma variação entre 1,47 e 1,68 para esse tipo de dispositivo.

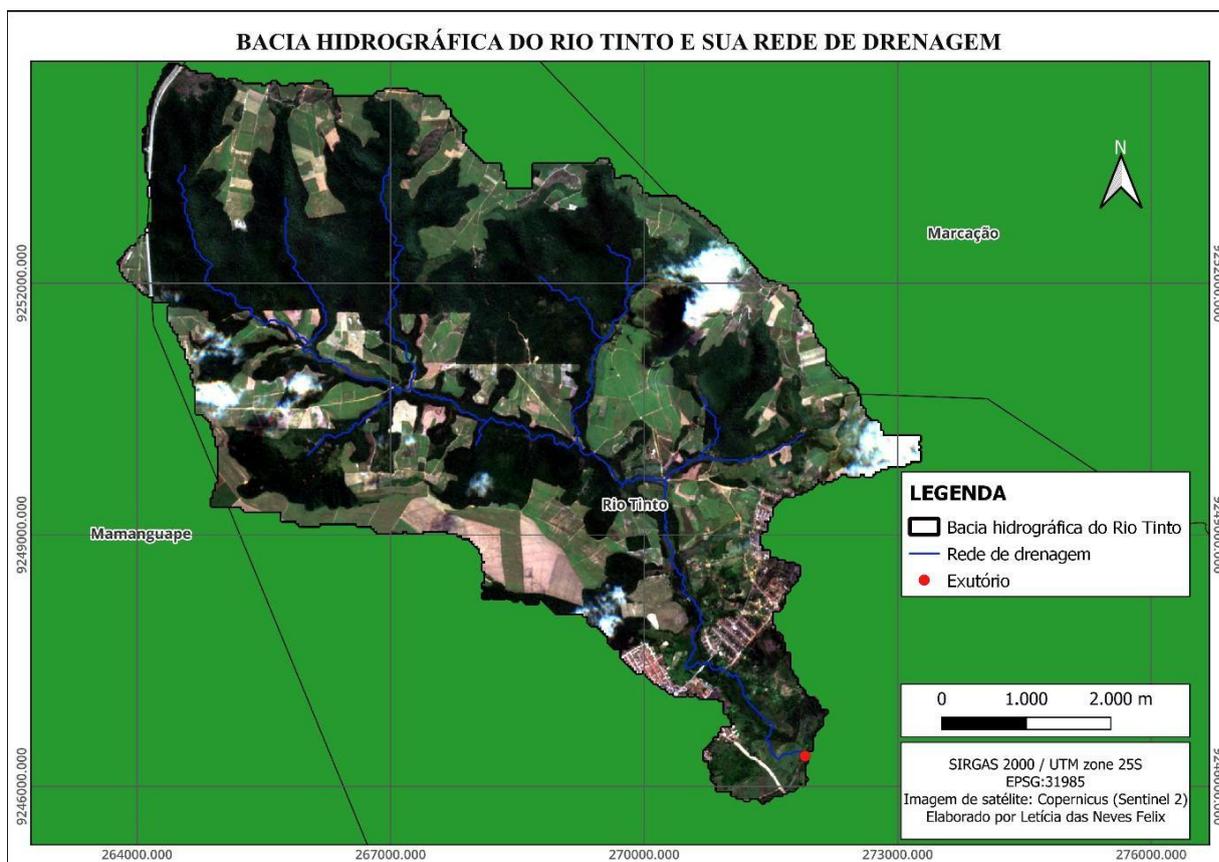
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ASPECTOS GERAIS DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS

4.1.1. Análise da delimitação e discretização da bacia hidrográfica

A bacia hidrográfica em estudo possui uma área total de, aproximadamente, 41,2 km², apresentando uma rede de drenagem dendrítica (ramificada), conforme os dados do CPRM (2005) e mostrado na Figura 18.

Figura 18: Bacia hidrográfica do Rio Tinto e sua rede de drenagem.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Para a simulação hidrológica, a bacia hidrográfica do Rio Tinto foi discretizada em 7 sub-bacias pelo HEC-HMS. O pré-processamento que resultou nessa discretização também gerou automaticamente os elementos de cada unidade. Entre eles, destacam-se as “sub-bacias hidrográfica” (representadas pela letra "S"), que representam um tipo de reservatório com a contribuição da sub-bacia hidrográfica a quem se refere; os rios (representados pela letra "R"); as junções (representadas pela letra "J") e o exutório (indicado por um círculo vermelho). Esses elementos, assim como a discretização da bacia hidrográfica, podem ser observados na Figura 19.

Figura 19: Sub-bacias hidrográficas geradas pelo HEC-HMS e elementos associados.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Essa discretização é importante para que o modelo identifique as diferentes respostas das sub-bacias hidrográficas, como o tempo de concentração, uso e cobertura do solo, declividade, entre outros fatores que influenciam diretamente no escoamento superficial.

Além disso, o *software* analisou os dados topográficos e calculou parâmetros que foram utilizados, posteriormente, nas etapas de simulação, entre eles, os principais estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Principais parâmetros obtidos do HEC-HMS.

Sub-bacia hidrográfica	Área (km²)	Comprimento do caminho mais longo (km)	Declividade do caminho mais longo (m/m)
S1	5,5	4,81	0,025
S2	10,73	6,57	0,034
S3	6,31	4,31	0,033
S4	4,70	4,28	0,030
S5	3,80	3,82	0,032
S6	2,45	3,22	0,035
S7	6,00	6,00	0,021

Fonte: elaborado pela autora, 2025

Os dados de comprimento e declividade foram utilizados para o cálculo do tempo de concentração de cada sub-bacia hidrográfica e, posteriormente, no cálculo do tempo de retardo que foi utilizado para desenvolvimento dos hidrogramas pelo HEC-HMS.

4.1.2. Análise dos parâmetros hidrológicos

- Tempo de concentração

Para a bacia hidrográfica do Rio Tinto, o tempo de concentração calculado, por meio da fórmula de Ven Te Chow, foi de 350 minutos. Esse valor já era esperado, considerando que a bacia hidrográfica apresenta áreas predominantemente naturais (não urbanizadas), conforme pode ser observado na Figura 18, fato que diminui o escoamento superficial e aumenta o tempo de chegada da água da chuva no exutório.

Quanto ao tempo de concentração (T_c) das sub-bacias hidrográfica que foram calculadas individualmente, estes podem ser observados na Tabela 4. São valores consideravelmente altos pela mesma razão explicada anteriormente.

Tabela 4: Tempo de concentração (Tc) das sub-bacias hidrográficas

Sub-bacia	Tc (min)	Tc (h)
S1	106,53	1,77
S2	144,27	2,40
S3	101,16	1,68
S4	102,92	1,71
S5	96,22	1,60
S6	82,10	1,36
S7	143,38	2,39

Fonte: elaborado pela autora, 2025.

- *Curve Number (CN)*

Outro parâmetro que influencia diretamente na geração de escoamento superficial, assim como o tempo de concentração, é o *Curve Number (CN)*. Como citado anteriormente, a bacia hidrográfica não apresenta predominância de áreas urbanizadas. Ao invés disso, os principais usos do solo da bacia hidrográfica são formações campestres, áreas com solo exposto e cobertura vegetal, como pode ser observado na Figura 20, fato que corrobora com o valor elevado para o tempo de concentração.

Figura 20: Uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do Rio Tinto.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Na Tabela 5 estão apresentadas as áreas referentes ao uso e ocupação do solo de cada sub-bacia hidrográfica, bem como os respectivos valores médios de CN. Vale ressaltar que a diferença de, aproximadamente, 1,3 km² entre a área total da bacia hidrográfica e a área apresentada na tabela, ocorreu devido à discretização realizada pelo HEC-HMS que durante o processamento, desconsiderou algumas áreas localizadas nas bordas da bacia hidrográfica.

Tabela 5: Valores de CN médio pra cada sub-bacia hidrográfica.

Condição de umidade II								
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	
1 Floresta (km²)	3,32	6,338	3,713	1,735	1,93	0,75	2,075	
3 Solo exposto (km²)	0,6276	1,35	0,349	0,843	0,87	0,62	1,481	
4 Campo/formação campestre (km²)	1,5029	2,45	1,739	1,627	0,89	1,05	1,916	
2 Área urbana (km²)	0,0169	0,177	0,055	0,091	0,03	0,46	0,199	
5 Nuvem (km²)	0,0154	0,42	0,45	0,416	0,07	0,02	0,322	
								Área total (km²)
Área (km²)	5,4828	10,73	6,307	4,712	3,79	2,89	5,993	39,9084
CN médio	61,8	63,1	62,1	64,9	64,4	64,1	65,9	

Fonte: elaborado pela autora, 2025.

É possível observar na Tabela 5 uma relação direta entre as sub-bacias hidrográficas com menor cobertura vegetal e os maiores valores de CN, refletindo uma menor capacidade de infiltração da água no solo e a maior propensão ao escoamento superficial.

Por outro lado, nas sub-bacias hidrográficas com maior presença de vegetação, a infiltração no solo e a retenção da água da chuva são mais expressivas, resultando em valores menores de CN. Ainda assim, nenhum dos valores obtidos tiveram diferença relevantes, os mesmos se mantiveram, em média, próximos aos típicos para áreas com cobertura vegetal, conforme apresentado na Tabela 2, adaptada de Tucci, Porto e Barros (1995), reforçando a conclusão da bacia hidrográfica ter características e elementos predominantemente naturais, com baixa influência de áreas urbanizadas.

Apesar disso, a área sofre com o estrangulamento do Rio Tinto devido a construção da rodovia PB-041, que o cruza e inunda após fortes chuvas, provocando transtornos na locomoção e aumentando a vulnerabilidade das áreas ocupadas entorno do rio.

- Chuva de projeto

A partir da curva IDF com os parâmetros ajustados para o município de Rio Tinto (Tabela 1), foi possível estimar a chuva de projeto. Considerando um período de retorno de 30 anos e adotando o tempo de concentração de 350 minutos como a duração da chuva, foram calculadas as intensidades para cada intervalo de tempo com incrementos de 10 minutos, após isso, a precipitação acumulada (P- acumulada); incremental (P- incremental) e ordenada (P- ordenada) utilizando o método dos blocos alternados para distribuição temporal.

A Tabela 6 apresenta os valores estimados, sendo a precipitação ordenada utilizada como dado de entrada no HEC-HMS.

Tabela 6: Cálculo da chuva efetiva.

Chuva de projeto				
Tc (min):	350		Tr (anos):	30
Duração (min):	350		Δt (min):	10
t (min)	i (mm/h)	P- acumulada (mm)	P- incremental (mm)	P- ordenada (mm)
10	206,81	34,47	34,47	0,99
20	155,29	51,76	17,29	1,04
30	125,99	63,00	11,23	1,10
40	106,86	71,24	8,24	1,16
50	93,28	77,73	6,49	1,24
60	83,08	83,08	5,35	1,33
70	75,12	87,64	4,56	1,43
80	68,71	91,61	3,97	1,56
90	63,42	95,14	3,52	1,71
100	58,98	98,31	3,17	1,90
110	55,19	101,19	2,88	2,13
120	51,92	103,84	2,65	2,45
130	49,05	106,28	2,45	2,88
140	46,53	108,56	2,28	3,52
150	44,28	110,70	2,13	4,56
160	42,26	112,70	2,01	6,49
170	40,45	114,60	1,90	11,23
180	38,80	116,40	1,80	34,47
190	37,30	118,10	1,71	17,29
200	35,92	119,73	1,63	8,24
210	34,65	121,29	1,56	5,35
220	33,49	122,78	1,49	3,97
230	32,40	124,22	1,43	3,17
240	31,40	125,60	1,38	2,65
250	30,46	126,93	1,33	2,28
260	29,59	128,21	1,28	2,01
270	28,77	129,45	1,24	1,80
280	28,00	130,65	1,20	1,63
290	27,27	131,82	1,16	1,49
300	26,59	132,95	1,13	1,38
310	25,94	134,04	1,10	1,28
320	25,33	135,11	1,07	1,20
330	24,75	136,15	1,04	1,13
340	24,21	137,16	1,01	1,07
350	23,68	138,15	0,99	1,01

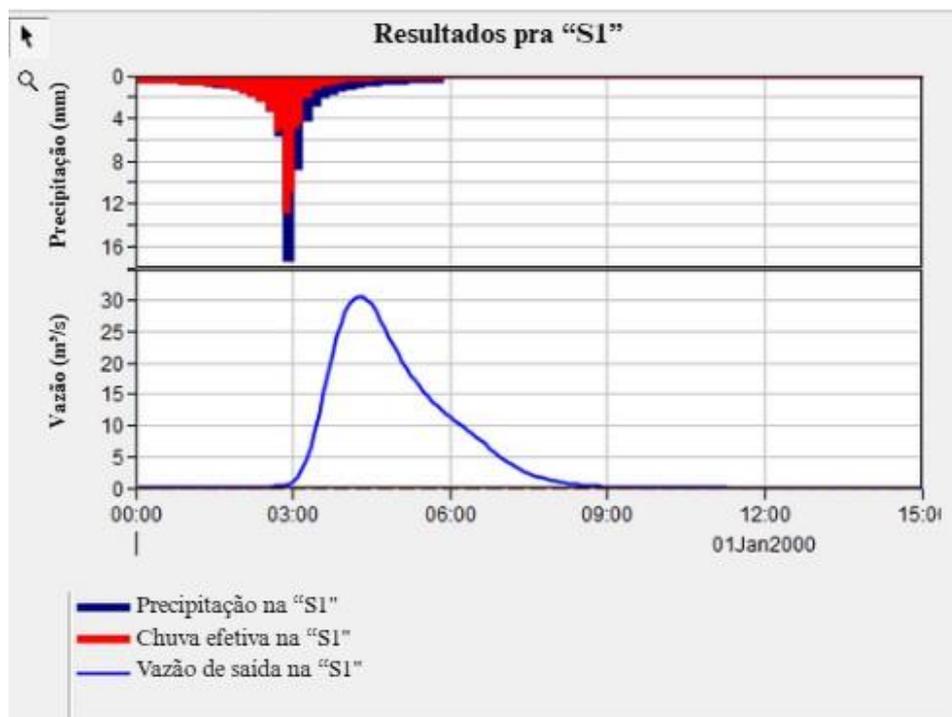
Fonte: elaborado pela autora, 2025.

4.2 ANÁLISE DO CENÁRIO SEM BACIA DE DETENÇÃO

- Cenário 0: sem bacia de detenção (condição atual)

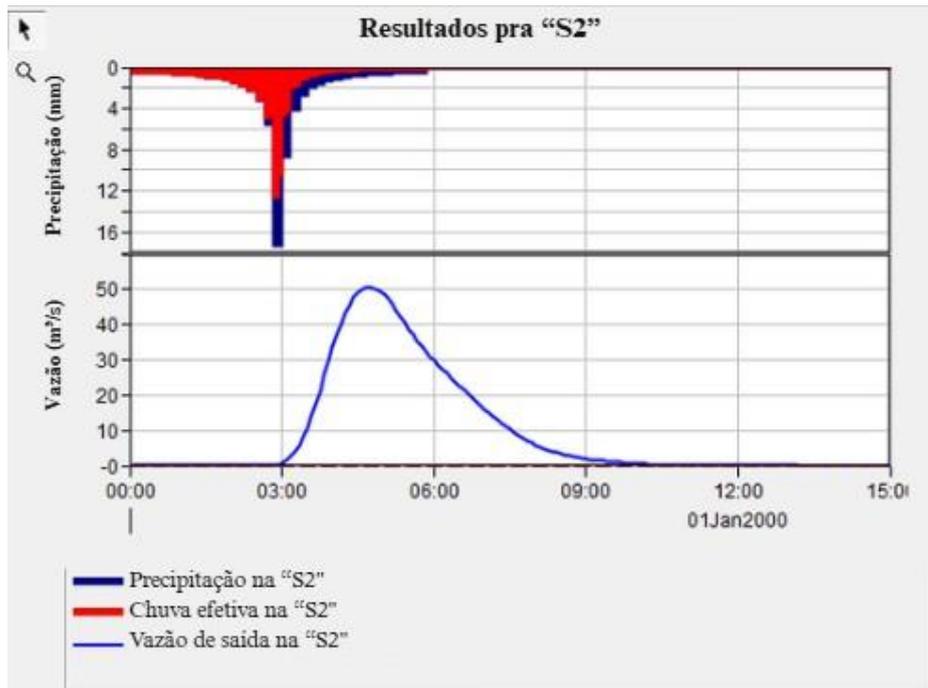
Após a inserção dos dados necessários para o cálculo da chuva de projeto, chuva efetiva e vazão de projeto, o HEC-HMS realizou a simulação hidrológica, gerando como resultado os hietogramas e hidrogramas para cada sub-bacia hidrográfica. Os gráficos com esses resultados estão apresentados nas Figuras 21, 22, 23, 24, 25, 26 e 27.

Figura 21: Hietograma e hidrograma da sub-bacia hidrográfica S1.



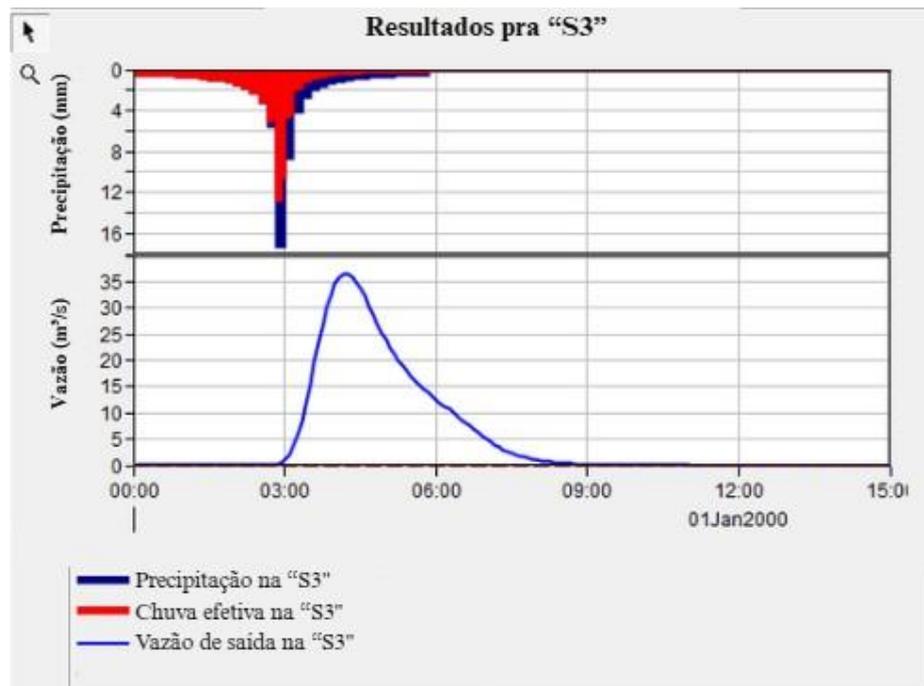
Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Figura 22: Hietograma e hidrograma da sub-bacia hidrográfica S2.



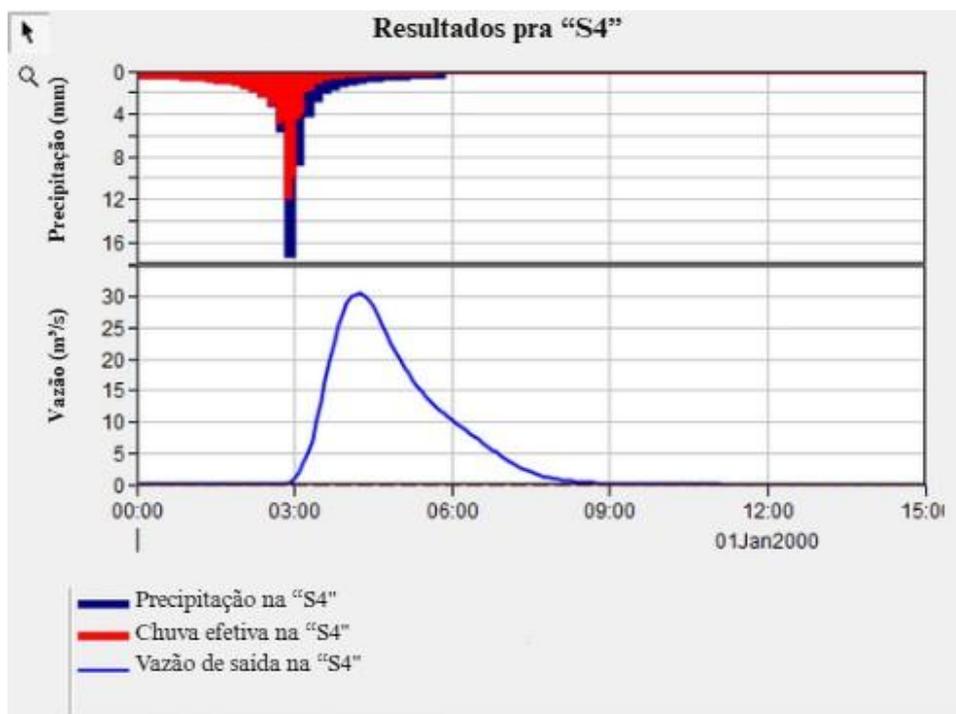
Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Figura 23: Hietograma e hidrograma da sub-bacia hidrográfica S3



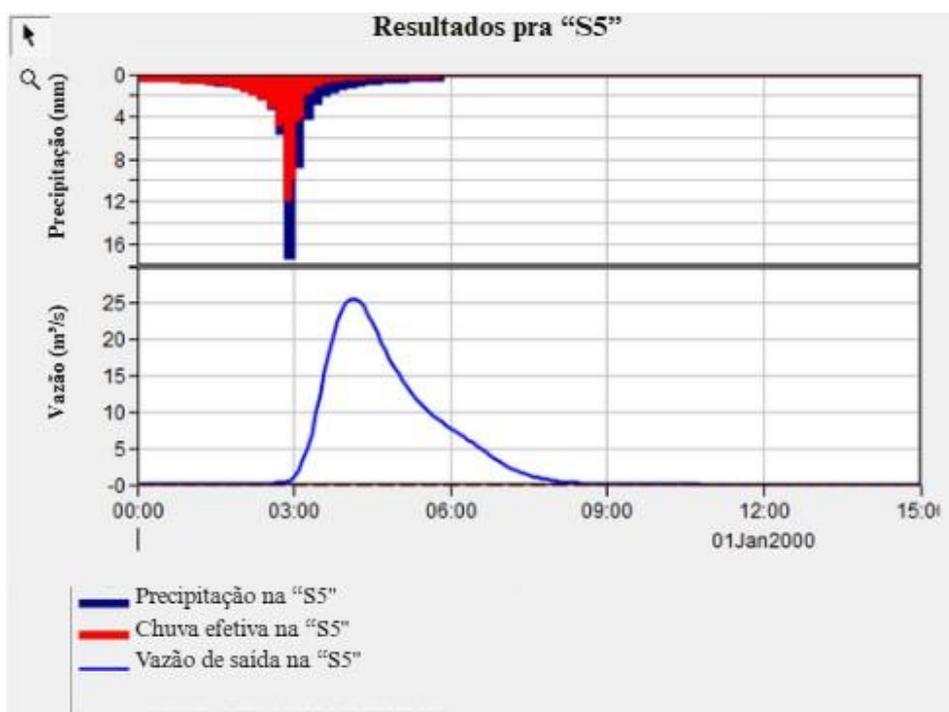
Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Figura 24: Hietograma e hidrograma da sub-bacia hidrográfica S4



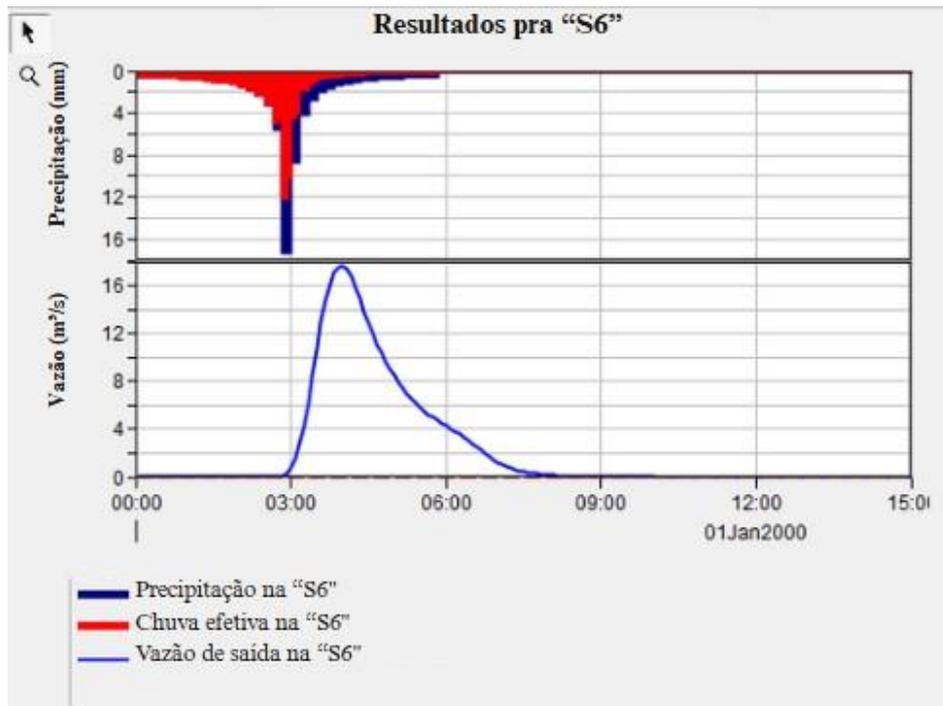
Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Figura 25: Hietograma e hidrograma da sub-bacia hidrográfica S5.



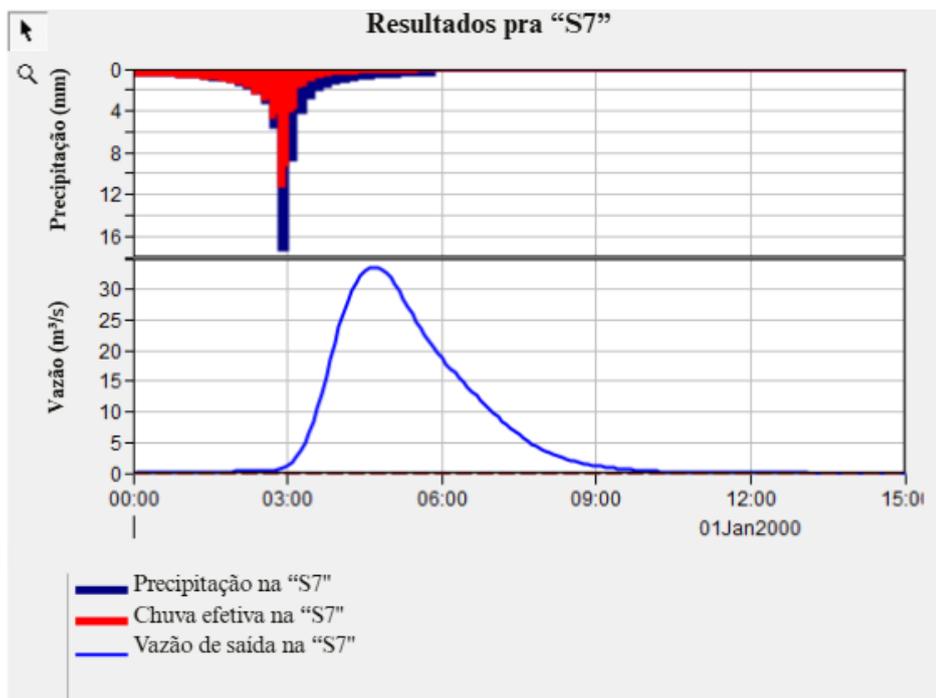
Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Figura 26: Hietograma e hidrograma da sub-bacia hidrográfica S6.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Figura 27: Hietograma e hidrograma da sub-bacia hidrográfica S7.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Conforme esperado, a sub-bacia hidrográfica com a maior área de contribuição (S2) apresentou também a maior vazão de pico, atingindo cerca de 50 m³/s. Os valores de vazão de pico de todas as sub-bacias estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Tempo de concentração das sub-bacias hidrográficas

Sub-bacia hidrográfica	Área de drenagem (km²)	Vazão de pico (m³/s)
S1	5,50	30,6
S2	10,7	50,6
S3	6,31	36,4
S4	4,70	30,5
S5	3,80	25,6
S6	2,45	17,6
S7	6,00	33,6

Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Dentre as sub-bacias hidrográficas analisadas, as que apresentaram as maiores vazões de pico foram a S2 e a S3, seguidas pela S7. Apesar de a S7 apresentar uma vazão superior à da sub-bacia hidrográfica S1, optou-se por implantar medidas de retenção nas sub-bacias hidrográficas S1, S2 e S3. A escolha da S1 se justifica por sua posição como sub-bacia hidrográfica de cabeceira, o que permite controlar o escoamento desde os pontos iniciais do sistema.

Além disso, é importante destacar uma particularidade do HEC-HMS: ele simula cada sub-bacia hidrográfica de forma independente, como se fosse um elemento isolado. Ou seja, o *software* considera apenas a vazão gerada dentro da própria sub-bacia hidrográfica e desconsidera as contribuições de montante. Assim, embora a sub-bacia hidrográfica S7 receba escoamento proveniente de áreas a montante devido a sua localização, o modelo atribui essas vazões à junção (J1) e ao canal (R1), e não à própria sub-bacia hidrográfica.

Isso também se aplica às sub-bacias hidrográficas S5 e S6. Por estarem localizadas mais a jusante, essas unidades podem apresentar vazões menores nos dados, pois parte dos volumes de contribuição provenientes de sub-bacias hidrográficas à montante não é diretamente atribuída a elas, mas sim às junções e aos rios que conectam essas áreas da bacia hidrográfica.

Portanto, caso fossem inseridos reservatórios nessas sub-bacias hidrográficas mais a jusante, seria necessário um maior volume pra retenção, o que resultaria em reservatórios com dimensões maiores. Considerando que o Cenário 1 já simulou uma estrutura de retenção dimensionada para controlar uma vazão representativa de praticamente toda a bacia

hidrográfica, o Cenário 2 buscou avaliar a eficácia de intervenções em sub-bacias hidrográficas de cabeceira, como alternativa para mitigar picos de cheia com estruturas menores. Os valores de vazão das junções, canais e exutório estão apresentados na Tabela 8,

Cabe destacar novamente que, em razão de particularidades no pré-processamento realizado pelo HEC-HMS, aproximadamente, 1,3 km² da área total da bacia hidrográfica foi desconsiderada pelo próprio *software* durante a etapa de discretização. Em função disso, há diferença entre a área de drenagem considerada pelo modelo e a área originalmente delimitada da bacia hidrográfica.

Tabela 8: Valores de vazão dos elementos junções, canais e exutório.

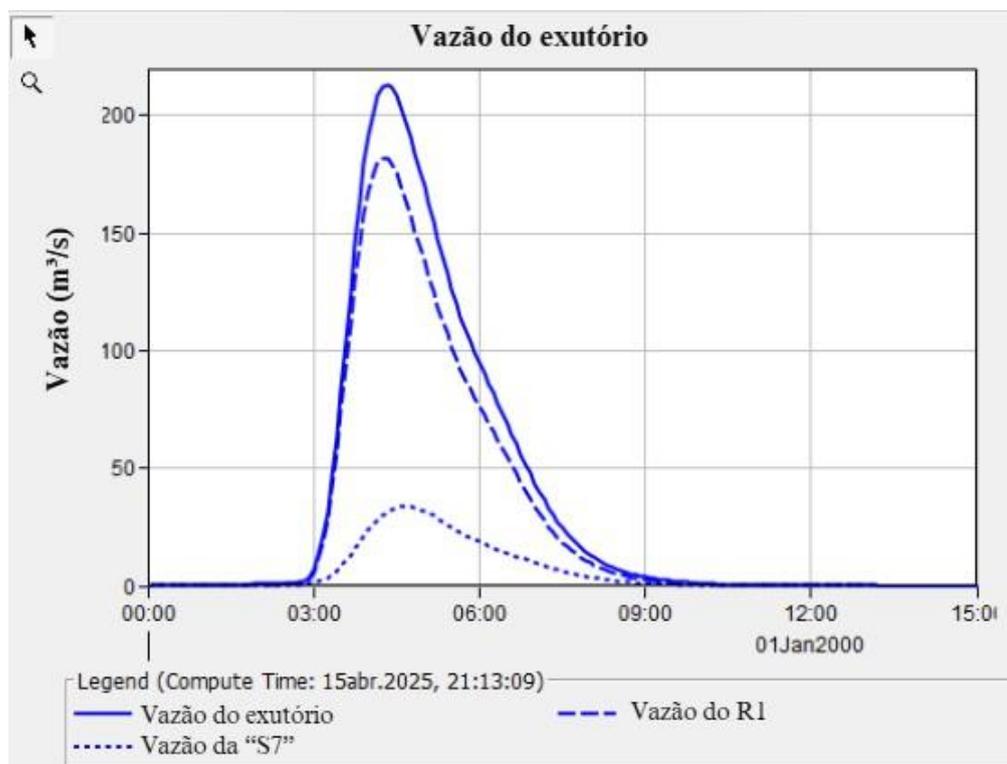
Elemento	Vazão (m³/s)	Área de drenagem (km²)
J1	182,1	33,5
J2	136,9	26,3
J3	78,5	16,2
R1	182,1	33,5
R2	136,9	26,3
R3	78,5	16,2
Exutório	213,1	39,5

Fonte: elaborado pela autora, 2025.

É válido destacar também a vazão de pico estimada no exutório da bacia hidrográfica, que atingiu, aproximadamente, 213 m³/s. Esse alto valor está relacionado a fatores como o tempo de retorno de 30 anos adotado no dimensionamento, conforme recomendado para obras de macrodrenagem, que exigem maior segurança frente a eventos extremos de chuva.

Entretanto, é importante considerar as limitações também associadas ao método do NRCS utilizado para a estimativa da chuva efetiva e da vazão de projeto. De acordo com Cunha et al. (2015), esse método tende a superestimar as vazões, conforme verificado em estudos comparativos com dados observacionais. Apesar disso, optou-se por sua aplicação em razão da escassez de dados hidrológicos reais da área de estudo e pela consolidação do método na literatura consultada. O hidrograma do exutório que é a somatória da vazão da S7 e do canal R1, pode ser observado na Figura 28.

Figura 28: Hidrograma no exutório da bacia hidrográfica do Rio Tinto.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

4.3 ANÁLISE DAS HIPÓTESES COM BACIA(S) DE DETENÇÃO

4.3.1. Parâmetros do reservatório

- Cenário 1: uma bacia de detenção

Para a mitigação da vazão de pico no exutório, optou-se inicialmente pelo dimensionamento de um reservatório de detenção interceptando a vazão proveniente da junção J1, que recebe a contribuição das sub-bacias hidrográficas a montante, conforme indicado na Figura 29. Portanto, a vazão do exutório corresponderá à vazão de saída do reservatório (que será a nova vazão de R1), somada à vazão gerada pela sub-bacia hidrográfica S7.

É válido ressaltar que a representação gráfica do reservatório na Figura 29 tem localização meramente ilustrativa.

Figura 29 – Localização da bacia de detenção no *software* HEC-HMS.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Considerando o objetivo inicial de atenuar a vazão de pico entre 30% e 40%, foi realizado um processo iterativo conforme apresentado na Figura 17. Os testes começaram com a simulação de uma bacia de detenção com dimensões de 100 m × 100 m e altura de 5 metros, mas essa configuração não foi suficiente. Dessa forma, foram testados outros valores para área mantendo-se a altura em 5 metros nesse cenário, para prevenir gastos maiores.

Esses parâmetros foram utilizados para definir a curva cota x volume, que serve como dado de entrada no HEC-HMS para a simulação dos reservatórios. A curva adotada, que atendeu à meta de atenuação, está apresentada na Tabela 9.

Tabela 9: Curva cota x volume do reservatório

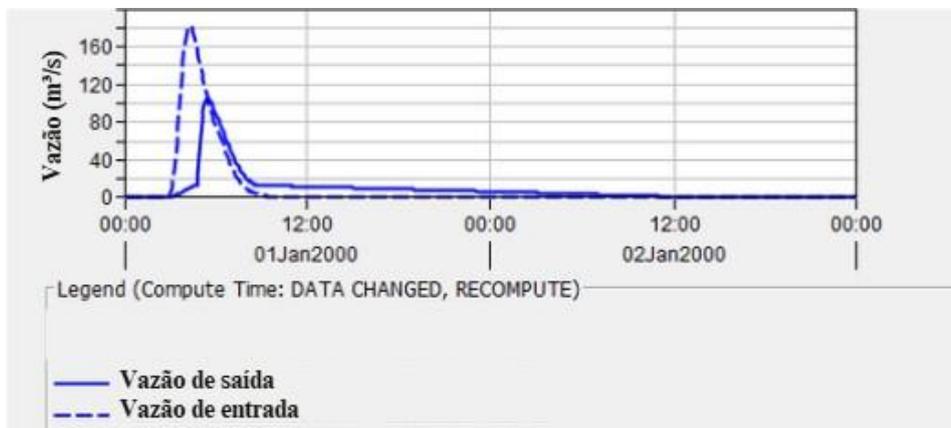
Cota (m)	Volume (m ³)	Área (m ²)
0	0	180000
1	180000	180000
2	360000	180000
3	540000	180000
4	720000	180000
5	900000	180000

Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Dada a elevada contribuição de vazão a ser armazenada, a área necessária para a bacia de detenção foi muito elevada, atingindo, aproximadamente, 180.000 m², com dimensões de 450 m x 400 m e altura de 5 metros. Para controlar os volumes acumulados foram aplicados também dispositivos de saída na bacia de detenção, sendo um orifício na base do reservatório com 2 m² e um vertedor de emergência com largura de 40 metros, dimensões adotadas que também fizeram parte do processo iterativo visando sempre evitar o superdimensionamento. Vale destacar que, durante esse processo, a área do orifício se mostrou um parâmetro mais sensível, enquanto a variação na largura do vertedor apresentou pouca influência nos resultados.

A simulação realizada no HEC-HMS demonstrou a eficácia do reservatório, evidenciada pela atenuação de cerca de 44% da vazão de pico que vem de montante (diminuição de 180 m³/s para, aproximadamente, 100m³/s), que se tornou a vazão de saída da J1, representado no gráfico da Figura 30. Portanto, no exutório observou-se também uma redução expressiva, da ordem de cerca de 38,3%, o que comprova a efetividade da solução adotada. A vazão de saída do exutório foi maior que a do reservatório (saída da J1) pois o esse ainda recebe contribuição da S7.

Figura 30: Influência do reservatório na atenuação da vazão.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

No *software*, o reservatório foi simulado com características para o tipo *on-line*, ou seja, instalado na linha principal do sistema ou conectado a ela em série (Canholi, 2014). Como exemplo dessa interceptação *on-line*, destaca-se a barragem de detenção de Hopua te Nihotetea, localizado em Whangārei, na Nova Zelândia (Figura 31). Esse exemplo foi selecionado por ilustrar a interceptação da estrutura diretamente no rio que durante eventos de cheia, retém temporariamente a água, liberando-a de forma controlada para evitar a sobrecarga no exutório (Northland Regional Council, 2022).

Figura 31 – Estrutura de retenção Hopua te Nihotetea- Nova Zelândia.



Fonte: adaptado de Northland Regional Council (2022).

Essa estrutura de retenção possui 18 metros de altura e capacidade para reter até 1,27 milhão de metros cúbicos de água pluvial durante chuvas intensas e investimento de 11 milhões de dólares. Foi construída com o objetivo de prevenir inundações a jusante, que poderiam atingir o centro da cidade de Whangārei e bairros vizinhos (Northland Regional Council, 2022). Trata-se de uma infraestrutura de grande porte e alto custo, cuja viabilidade foi justificada pela segurança que proporciona à população local.

Embora não seja possível estabelecer uma comparação direta entre o reservatório Hopua te Nihotetea e as soluções propostas para a área de estudo, devido às particularidades hidrológicas, estruturais, topográficas, climáticas e até mesmo econômica de cada região, é válido destacar que obras como essa têm se mostrado fundamentais na proteção de áreas urbanas situadas a jusante. Segundo NRC (2022), durante eventos extremos de precipitação, a estrutura tem desempenhado seu papel na prevenção de inundações em Whangārei, comprovando sua eficácia na mitigação de riscos associados a chuvas intensas. Além disso, é importante destacar que a obra foi dimensionada para suportar chuvas com períodos de retorno de 100 anos ou mais e já consideram os efeitos das mudanças climáticas, como o aumento de até 20% na precipitação e a elevação do nível do mar (NRC, 2022).

Dessa forma, considerando o contexto brasileiro, onde eventos extremos têm se tornado cada vez mais frequentes devido às mudanças climáticas, o exemplo de Whangārei reforça a importância de se levar em conta esses fatores nos estudos de dimensionamento. Além disso, evidencia que o investimento em estruturas como bacias de retenção pode ser uma estratégia eficaz e necessária para mitigar danos e proteger a população.

- Cenário 2: Mais de uma bacia de retenção

O segundo cenário analisado propôs a inserção de mais de uma bacia de detenção dentro da bacia hidrográfica do Rio Tinto, especificamente nas sub-bacias hidrográficas S1, S2 e S3 por serem de cabeceiras e apresentarem maior contribuição. A proposta consistiu em simular múltiplas bacias de detenção com dimensões reduzidas (em área e altura), de modo a atenuar uma vazão semelhante à do Cenário 1, porém adotando uma abordagem distribuída, com o objetivo de identificar a estratégia mais eficiente em comparação ao primeiro cenário.

Para dar início às iterações e simulações, foram considerados duas hipóteses:

1. Inserção de duas bacias de detenção com altura inferior à utilizada no Cenário 1;
2. Inserção de três bacias de detenção com alturas ainda menores.

Primeira Proposta: duas bacias de detenção

Na primeira simulação, foram implementadas duas bacias de detenção nas sub-bacias hidrográficas S1 e S2. Sendo o reservatório da S1 com dimensões de 250 m x 250 m e altura de 4 metros (conforme mostra Tabela 10) e o reservatório da S2 com 350m x 250m e 4 metros de altura (Tabela 11). Essa configuração resultou em uma atenuação de, aproximadamente, 30% da vazão no exutório da bacia hidrográfica. Quanto aos dispositivos de saída, assim como no Cenário 1, foi simulado um orifício na base do reservatório com 2 m² e um vertedor de emergência com largura de 40 metros.

Tabela 10: Curva cota x volume do Reservatório 1.

Cota (m)	Volume (m ³)	Área (m ²)
0	0	62.500
1	62.500	62.500
2	125.000	62.500
3	187.500	62.500
4	250.000	62.500

Fonte: elaborado pela autora, 2025.

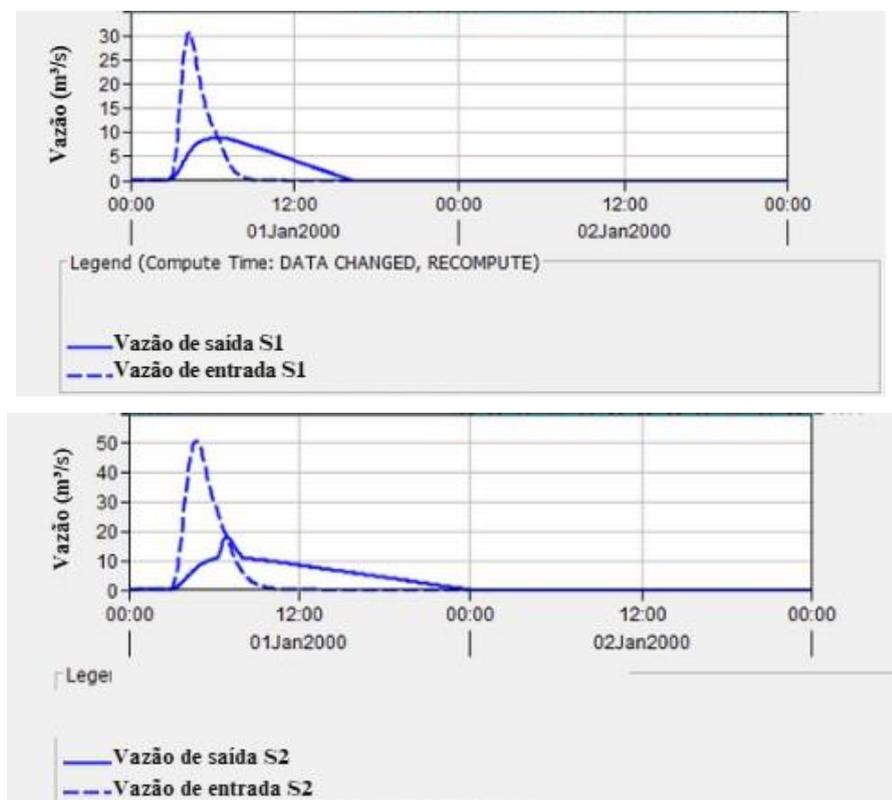
Tabela 11: Curva cota x volume do Reservatório 2.

Cota (m)	Volume (m ³)	Área (m ²)
0	0	87.500
1	87.500	87.500
2	175.000	87.500
3	262.500	87.500
4	350.000	87.500

Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Apesar da redução da vazão no exutório não ter sido tão elevada como o Cenário 1, a atenuação individual na vazão de saída das sub-bacias hidrográficas S1 e S2 foi muito expressiva conforme demonstrado nos gráficos da Figura 32. No entanto, como a bacia hidrográfica ainda recebe contribuição de outras cinco sub-bacias hidrográficas, o impacto geral na diminuição da vazão do exutório foi prejudicado. Por essa razão, optou-se por encerrar a simulação após atingir a meta de 30% de atenuação, evitando o superdimensionamento de estruturas que trariam pouco benefício adicional na atenuação da vazão de saída do exutório.

Figura 32: Influência do reservatório na vazão das sub-bacias hidrográficas S1 e S2.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Segunda Proposta: três bacias de detenção

Na segunda hipótese, foram inseridos três reservatórios nas sub-bacias hidrográficas S1, S2 e S3, com a inclusão da bacia de detenção na sub-bacia hidrográfica S3, foi possível alcançar uma atenuação de, aproximadamente, 37% na vazão de saída do exutório, valor mais próximo ao obtido no Cenário 1. Para isso, cada reservatório foi projetado com altura de 3 metros. As suas dimensões estão descritas na Tabela 12.

Tabela 12: Curva cota x volume dos reservatórios.

Reservatório S2			
Cota (m)	Volume (m³)	Área (m²)	
0		0	70.000
1		70.000	70.000
2		140.000	70.000
3		210.000	70.000

Reservatório S1			
Cota (m)	Volume (m³)	Área (m²)	
0		0	44.000
1		44.000	44.000
2		88.000	44.000
3		132.000	44.000

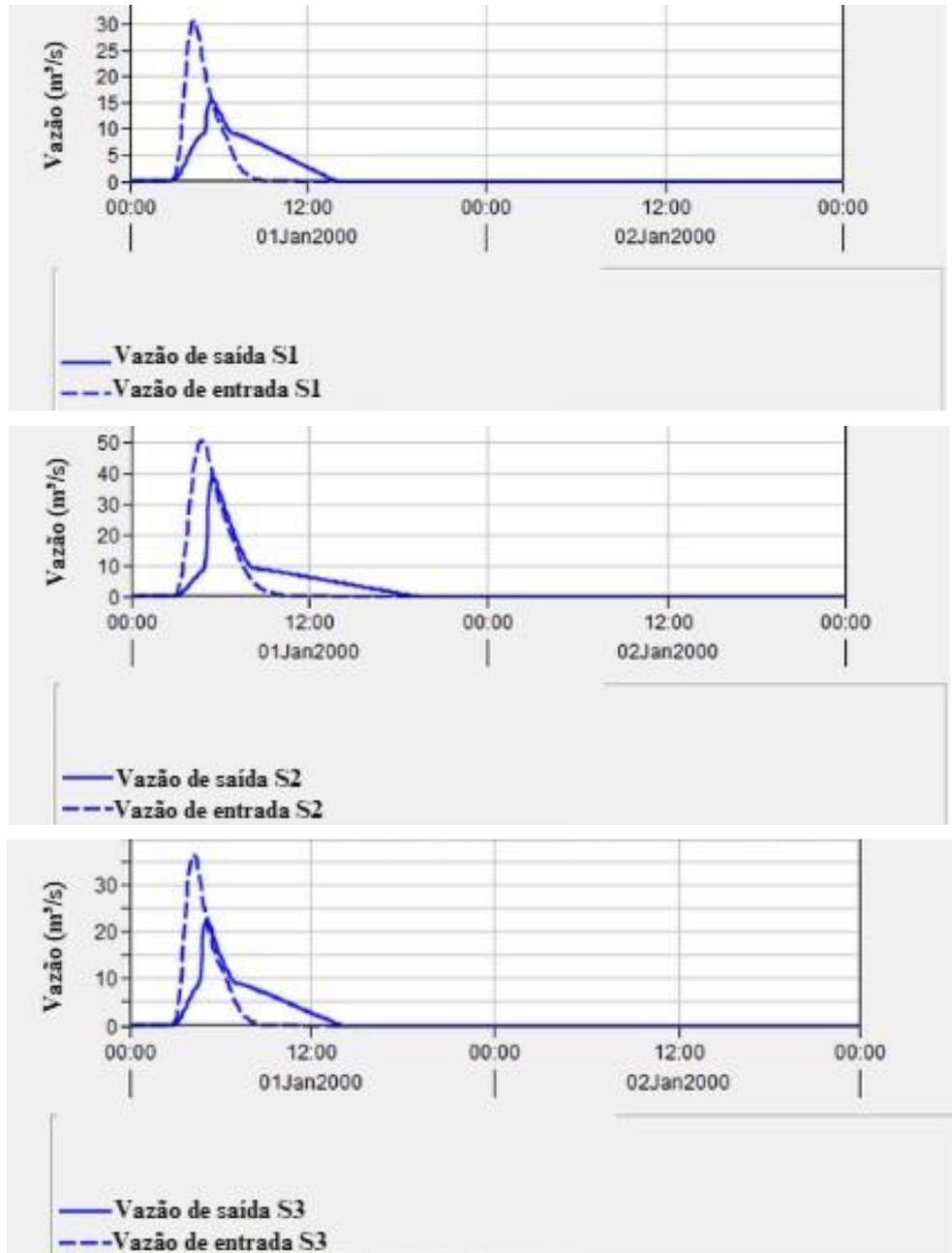
Reservatório S3			
Cota (m)	Volume (m³)	Área (m²)	
0		0	44.000
1		44.000	44.000
2		88.000	44.000
3		132.000	44.000

Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Dentre as três sub-bacias hidrográficas, a S2 apresentou a maior contribuição de vazão, exigindo, portanto, uma área de reservatório maior para atingir o desempenho desejado, como alcançado nas S1 e S3 que apresentaram atenuações expressivas com áreas menores. Os gráficos individuais pra cada reservatório pode ser observado na Figura 33.

Além disso, quanto aos dispositivos (vertedor e orifício de saída), esses foram simulados com as mesmas dimensões das hipóteses anteriores, ou seja, 2 m² para o orifício e um vertedor de emergência com largura de 40 metros.

Figura 33: Influência do reservatório na vazão das sub-bacias hidrográficas S1, S2 e S3, respectivamente.



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

4.3.2. Comparação entre hipóteses

Na Tabela 13 é possível visualizar um resumo dos valores de atenuação da vazão para cada cenário simulado, comparado com a vazão inicial, bem como as respectivas dimensões dos reservatórios.

Tabela 13 – Resumo com dados sobre os reservatórios de cada cenário.

	Cenário 1	Cenário 2
Vazão de saída do exutório antes do reservatório (m³/s)	213,1	213,1
Vazão de saída depois do reservatório e (m³/s)	131,5	134,5
Diminuição da vazão de pico (%)	38,29	36,88
Área total necessária (m²)	180.000	158.000
Altura total necessária (m)	5	9
Volume total necessário (m³)	900.000	474.000

Fonte: elaborado pela autora, 2025.

No Cenário 2, a implantação de duas bacias de detenção, foi descartada devido à baixa eficiência na redução da vazão no exutório, mesmo com a utilização de reservatórios de dimensões consideráveis, portanto, na Tabela 13 considerou-se apenas a hipótese com três bacias de detenção no Cenário 2. Essa simulação com as estruturas distribuídas nas sub-bacias hidrográficas S1, S2 e S3, apresentou desempenho satisfatório, com atenuação dentro da meta estabelecida (entre 30% e 40%) e próxima a atenuação do Cenário 1.

Embora a área total ocupada por esses três reservatórios seja inferior à do Cenário 1, o custo tende a ser maior, dado que serão necessárias três estruturas de 3 metros de profundidade. Ainda assim, por ocuparem áreas distintas e menores, esse arranjo pode ser vantajoso do ponto de vista da ocupação do solo.

Entretanto, é importante atentar-se a uma característica relacionada ao uso de múltiplos reservatórios, pois quando mais de uma bacia de detenção é instalada em regiões mais acima, como ocorre neste caso, há o risco de liberação simultânea das águas durante ou após eventos de chuvas intensas. Essa possibilidade foi identificada a partir da análise da Figura 33, que evidencia que os picos de vazão de saída dos três reservatórios ocorrem em intervalos muito próximos, entre 5h00' e 5h20'. Embora essa sincronização não represente, por si só, uma sobrecarga do sistema, é um aspecto que merece atenção, uma vez que pode comprometer a eficiência do controle de cheias.

Fatores como esses podem ocasionar a formação de um novo pico de vazão a jusante, potencialmente maior do que o previsto, comprometendo a eficiência do sistema e até mesmo agravando riscos de inundação em áreas próximas ao exutório.

Portanto, considerando as características e dimensões dos reservatórios de cada cenário analisado, o Cenário 1 pode ser mais viável e eficiente, mesmo com a adoção de um único

reservatório de grandes dimensões. Essa alternativa proporcionou uma atenuação de, aproximadamente, 38% da vazão de pico no exutório, atendendo aos objetivos propostos para o estudo. Além disso, por concentrar a estrutura em um único ponto, a complexidade operacional é menor, assim como evita a possibilidade de liberação simultânea de grandes quantidades de águas, aspecto que foi identificado no Cenário 2 com a utilização de mais de um reservatório.

A proposta de local para implantação do reservatório está apresentada na Figura 34. A escolha da área considerou a característica *on-line* do reservatório, que, como desvantagem, implica no desmatamento de algumas áreas. Além disso, optou-se por locais afastados das áreas residenciais próximas ao rio e que já apresentavam solos expostos. Ressalta-se que a análise foi baseada nessas características, sem a realização de visitas *in loco* ou levantamentos topográficos detalhados.

Figura 34: Proposta de local pra implementação do reservatório.



Fonte: Google Earth Pro, 2025.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo principal o pré-dimensionamento de bacias de retenção com foco na atenuação dos picos de cheia na bacia hidrográfica do Rio Tinto, utilizando o *software* HEC-HMS como ferramenta de simulação hidrológica. Apesar do caráter preliminar do estudo, fatores como a ausência de dados reais de vazão para calibração e a tendência à superestimação inerente ao método do NRCS para estimativa da chuva efetiva e vazão de projeto, podem ter causado um superdimensionamento da obra.

Todavia, o trabalho evidenciou a necessidade de estudos hidrológicos para a cidade de Rio Tinto, principalmente considerando que o município foi classificado com alto índice de ameaça a eventos de inundação, segundo o AdaptaBrasil MCTI (2025). E a partir de estudos como esse, torna-se possível o fornecimento de subsídio técnico ao município, para o planejamento de estratégias para mitigação dos riscos associados às inundações, principalmente se a cidade investir no monitoramento e coleta de dados em campo.

Contudo, mais do que apenas propor soluções estruturais através do pré-dimensionamento e a análise comparativa de cenários com o uso de dispositivos de retenção, conforme proposto neste estudo, destaca-se a necessidade da integração entre medidas estruturais e não estruturais para a gestão eficiente dos eventos de cheia. Como aponta Tucci (1995b), a confiança exclusiva em obras físicas pode gerar uma falsa sensação de segurança. Portanto, ações complementares como sistemas de alerta, educação ambiental e o planejamento adequado do uso do solo tornam-se fundamentais para a redução de riscos e danos, promovendo resiliência e sustentabilidade a longo prazo.

Para estudos futuros, recomenda-se a utilização de modelos climáticos que considerem a influência de eventos extremos para o cálculo da chuva de projeto, como os já desenvolvidos e disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Além disso, destaca-se também que este trabalho não contemplou a análise dos impactos ambientais associados à implantação da bacia de retenção. Assim, sugere-se também a elaboração de análises que incluam a avaliação da interação da estrutura com o meio natural, considerando os impactos de sua instalação, operação e manutenção, de modo a garantir a viabilidade ambiental, técnica e social da obra.

REFERÊNCIAS

AMARAL, R.; RIBEIRO, R. R. **Inundações e enchentes**. In: TOMINAGA, L. D.; SANTORO, J.; AMARAL, R (Org.). Desastres naturais: conhecer para prevenir. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. cap. 3, p. 39-52.

AMARAL, Rosângela do; MONI, Sandra. **Você sabe o que é inundação?** São Paulo, SP: Instituto Geológico, 2020. 40 p. : il. color. (Coleção Geonatural; v. 4). ISBN 978-65-87656-007.

ARAGÃO, Ricardo de et al. **Equações de intensidade-duração-frequência (IDF) para o Estado da Paraíba, Brasil, e regionalização de seus parâmetros**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 28, n. 10, e283679, 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n10e283679>.

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana**. 1ª ed. Porto Alegre: ABRH, 2005. 266 p.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). **Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem**. 2. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2005. 133 p. (IPR. Publ., 715).

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). **AdaptaBrasil MCTI: sistema de informação sobre impactos das mudanças climáticas**. Disponível em: <https://sistema.adaptabrasil.mcti.gov.br>. Acesso em: 05 abr. 2025.

CABRAL, Lobe do Nascimento; CÂNDIDO, Gesinaldo Ataíde. **Urbanização, vulnerabilidade, resiliência: relações conceituais e compreensões de causa e efeito**. urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana, Curitiba, v. 11, e20180063, 2019. DOI: 10.1590/2175-3369.011.002.AO08. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.002.AO08>. Acesso em: 06 abr. 2025.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. ISBN 978-85-7975-181-3.

CEMADEN. **Inundação**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/cemaden/pt-br/paginas/ameacasnaturais/inundacao#:~:text=Inunda%C3%A7%C3%A3o%20%C3%A9%20processo%20em,se%20encontram%20submersas%20%5Bi%5D>. Acesso em: 6 abr. 2025.

CHOW, V. T.; MAIDMENI, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. Berkshire, Uk: McGraw-hill Book Co (uk), 572 p. 1988.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. 2ª impressão. Porto Alegre: ABRH, 2015. 336 p. ISBN 978-85-88686-34-2.

COPERNICUS DEM; FABDEM. **Forest and Buildings removed Copernicus DEM**: European Space Agency (ESA), 2021. Disponível em: <https://data.bris.ac.uk/data/dataset/25wfy0f9ukoge2gs7a5mqpq2j7>. Acesso em: 11 mar. 2025.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea: diagnóstico do município de Rio Tinto, estado da Paraíba**. Organizado por João de Castro Mascarenhas et al. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005.

CUNHA, S. F. et al. **Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 20, n. 4, p. 837-848, 2015.

DIAS, Maria A. F. **Eventos Climáticos Extremos**. Revista USP, São Paulo, n. 103, p. 33-40, nov. 2014. DOI: 10.11606/issn.2316-9036.v0i103p33-40.

EPAL – Empresa Portuguesa das Águas Livres. **Comunicação ambiental: ciclo da água**. Disponível em: <https://www.epal.pt/EPAL/menu/epal/comunicação-ambiental/ciclo-da-água>. Acesso em: 05 abr. 2025.

FERRAZ, Caio Mário Leal. **Inundações e alagamentos em meio urbano: uma perspectiva teórico-conceitual, em abordagem geomorfológica**. Revista Vozes dos Vales: Publicações Acadêmicas, n. 20, ano X, 2021. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM.

FERREIRA, Luanny Gabriele Cunha; KEMENES, Alexandre. **A influência dos eventos climáticos extremos sobre reservatórios do Nordeste**. Revista Brasileira de Climatologia, v. 25, p. 182-203, jul./dez. 2019. ISSN 2237-8642 (eletrônico). Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1112545>. Acesso em: 05 abr. 2026.

G1 PARAÍBA. **Chuvvas intensas provocam alagamentos e causam transtornos no trânsito em João Pessoa**. G1 Paraíba, 28 jan. 2025. Disponível em:

<https://g1.globo.com/pb/paraiba/noticia/2025/01/28/chuvas-intensas-provocam-alagamentos-e-causam-transtornos-no-transito-em-joao-pessoa.ghtml>. Acesso em: 12 abr. 2025.

G1 PARAÍBA. **Famílias de Rio Tinto, na PB, são afetadas por alagamentos após Rio Mamanguape transbordar.** G1, 7 fev. 2025. Disponível em: <https://g1.globo.com/pb/paraiba/noticia/2025/02/07/familias-de-rio-tinto-na-pb-sao-afetadas-por-alagamentos-apos-rio-mamanguape-transbordar.ghtml>. 05 Abr. 2025.

G1 PARAÍBA. **Moradores têm que se deslocar de canoa e aulas são suspensas em Rio Tinto, na Paraíba.** G1, 31 mai. 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/pb/paraiba/noticia/2022/05/31/moradores-tem-que-se-deslocar-de-canoa-e-aulas-sao-suspensas-em-rio-tinto-na-paraiba.ghtml>. Acesso em: 05 abr. 2025.

IBGE. **De 2010 a 2022, população brasileira cresce 6,5% e chega a 203,1 milhões.** Agência de Notícias IBGE, 28 jun. 2023. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37237-de-2010-a-2022-populacao-brasileira-cresce-6-5-e-chega-a-203-1-milhoes>. Acesso em: 06 abr. 2025.

IBGE. Rio Tinto (PB). **Cidades e Estados.** Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pb/rio-tinto.html>. Acesso em: 05 abr. 2025

KOBIYAMA, M. et al. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos.** Florianópolis: Organic Trading, 2006. 109 p.

McCUEN, Richard H. **Hydrologic analysis and design.** Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 1998.

McCUEN, R. H. et al. **Estimating urban time of concentration.** Journal of Hydraulic Engineering, v. 110, n. 7, p. 887-904, 1984.

MELO, Marcos José Vieira de. **Medidas estruturais e não-estruturais de controle de escoamento superficial aplicáveis na bacia do rio Frágoso na cidade de Olinda.** 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

MEDEIROS, Eduardo Luiz Chaves de. **Modelagem computacional do Riacho Sítio dos Pintos no Recife incluindo os efeitos de técnicas compensatórias.** 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Enchentes.** Brasil, Ministério da Saúde, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z/e/enchentes>. Acesso em: 06 abr. 2025.

MOCKUS, V. **Hydrologic Soil Groups**. In: USDA-SCS. National Engineering Handbook: Section 4, Chapter 7, Hydrology. 1972.

NAKAZONE, Lucia Midori. **Implantação de reservatórios de retenção em conjuntos habitacionais: a experiência da CDHU. 2005**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

NORTHLAND REGIONAL COUNCIL. **The dam that helps save Whangārei**. Northland Regional Council, 2022. Disponível em: <https://www.nrc.govt.nz/news/2022/december/the-dam-that-helps-save-whangarei/>. Acesso em: 05 abr. 2025.

PARANÁ. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos; SUPERHIDRO. **Plano diretor de drenagem para região do rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba: manual de drenagem urbana**. Curitiba: SUPERHIDRO, 2002.

PORTO, R. L. L.; FILHO, K. Z. **Retenção e detenção**. Disciplina do curso de especialização em Gestão do Ambiente Construído: Planejamento e Intervenção. São Paulo: CDHU, 2004.

ROCHA, Humberto R. da et al. **Ciclo Hidrológico e Microclima**. In: PIVELLO, V. R.; VARANDA, E. M. (Org.). O Cerrado Pé-de-Gigante: Parque Estadual de Vassununga – Ecologia e Conservação. São Paulo: SMA, 2005. p. 53.

SARTORI, Aderson; LOMBARDI NETO, Francisco; GENOVEZ, Abel Maia. **Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos: Parte 1: Classificação**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 10, n. 4, p. 5-18, out./dez. 2005.

SILVA P. J. **Uso e Ocupação do Solo Urbano: Uma análise dos impactos ambientais nas áreas de dunas no bairro de Felipe Camarão/Natal-RN**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Holos, ano 31, v. 5, 2015.

SILVEIRA, A. L. L. **Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais**. RBRH: revista brasileira de recursos hídricos, v. 10, n. 1, p. 5-23, jan./mar. 2005.

SINGH, Vijay P. **Hydrologic modeling: progress and future directions**. Geoscience Letters, v. 5, n. 1, p. 1-18, 2018.

TUCCI, C. E. M.; GENZ, F. (1995a) – "**Controle do Impacto da Urbanização**" – In: Drenagem Urbana / organizado por Carlos E. M. Tucci, Rubem La Laina Porto e Mário T. Barros – Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS.

TUCCI, Carlos E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: EDUSP/ABRH, 1993. 943 p. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos; v. 4).

TUCCI, Carlos E. M. Águas Urbanas. In: TUCCI, Carlos E. M.; BERTONI, Juan Carlos (Org.). **Inundações urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: ABRH, 2003.

TUCCI, Carlos E. M. **Inundações Urbanas**. Porto Alegre: ABRH, 2007.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. ABRH-UFRGS, Porto Alegre, 2005

TUCCI, Carlos E. M.; PORTO, Rubem La Laina; BARROS, Mario T. de (Org.). **Drenagem urbana**. Porto Alegre: ABRH/UFRGS, 1995. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos; v. 5).

TUNDISI, José Galizia. **Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado**. Ciência e Cultura, v. 55, n. 4, p. 31-33, 2003.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). Hydrologic Engineering Center (HEC). **Hydrologic Modeling System HEC-HMS: user's manual**. Version 4.2. Davis: USACE, 2016. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>. Acesso em: 06 abr. 2025.

URBONAS, B. **Assessment of Stormwater Best Management Practice Effectiveness, Innovative Urban Wet-Weather Flow Management Systems**. USA: EPA, 1999. (EPA/600/R-99/029, chapter 7). Disponível em: <www.epa.gov/ORD/NRMRI/pubs>. Acesso em: nov. 2004.

USA. **HEC-HMS Applications Guide**. USACE, 1997. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsag/>. Acesso em: 06 abr. 2025.