



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

LARA FRANÇA DA SILVA

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA DE EVENTOS DE CHUVA
INTENSA NA BACIA DO SÍTIO DOS PINTOS, RECIFE-PE, EM DIFERENTES
CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO ANTECEDENTE**

RECIFE, 2026



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

LARA FRANÇA DA SILVA

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA DE EVENTOS DE CHUVA
INTENSA NA BACIA DO SÍTIO DOS PINTOS, RECIFE-PE, EM DIFERENTES
CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO ANTECEDENTE**

Projeto Final de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como pré-requisito para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Ambiental.

Orientador: Professor Dr. Vicente de Paulo Silva

Co Orientador: Professor Dr. Thiago Cabral Nepomuceno

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Suely Manzi – CRB-4 809

S586s Silva, Lara França da.
Simulação hidrológica e hidrodinâmica de eventos de chuva intensa na bacia do Sítio dos Pintos, Recife-PE, em diferentes condições de escoamento antecedente / Lara França da Silva. - Recife, 2026.
57 f.; il.

Orientador(a): Vicente de Paulo Silva.
Co-orientador(a): Thiago Cabral Nepomuceno.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado em Engenharia Ambiental, Recife, BR-PE, 2026.

Inclui referências e anexo(s).

1. Hidrologia . 2. Hidrodinâmica. 3. Inundações . 4. Escoamento urbano 5. Engenharia ambiental - Estudo e ensino. I. Silva, Vicente de Paulo, orient. II. Nepomuceno, Thiago Cabral, coorient. III. Título

CDD 628

LARA FRANÇA DA SILVA

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA DE EVENTOS DE CHUVA
INTENSA NA BACIA DO SÍTIO DOS PINTOS, RECIFE-PE, EM DIFERENTES
CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO ANTECEDENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Bacharelado em
Engenharia Ambiental da Universidade
Federal Rural de Pernambuco, como
pré-requisito para obtenção do título de
Bacharela em Engenharia Ambiental.

COMISSÃO AVALIADORA

Prof. Dr. Vicente de Paulo Silva (Orientador)

Departamento de Tecnologia Rural - Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Thiago Cabral Nepomuceno (Co Orientador)

Departamento de Tecnologia Rural - Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Julio Correa da Silva de Oliveira Andrade (Membro)

Departamento de Tecnologia Rural - Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Robson José Silva (Membro)

Departamento de Tecnologia Rural - Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dedico este trabalho aos meus familiares, por todo apoio, carinho e incentivo ao longo da minha trajetória acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, meu grande Pai e guia, por ter me sustentado ao longo de toda a minha trajetória acadêmica, concedendo força, discernimento e serenidade para superar os desafios encontrados ao longo do caminho.

À minha família, base de tudo, expresso minha mais profunda gratidão. À minha mãe, Evania França, por todo o amor, cuidado, apoio incondicional e incentivo constante, sempre acreditando no meu potencial e torcendo pelo meu sucesso. Ao meu irmão, Gustavo França, por me incentivar e acreditar no meu potencial. Ao meu pai, Josias Benedito, por ser provedor, incentivador e entusiasta da minha formação acadêmica. Ao meu padrinho, Ednaldo Tavares, e à minha madrinha, Elizete França, por estarem sempre ao meu lado, oferecendo apoio. Às minhas tias Edileusa, Eli, Edilene, Evani e Jaciane, grandes incentivadoras da minha caminhada. Aos meus avós Miriam Josefa, Antônio Ulisses e Albertina, pelo amor, pelos ensinamentos e pelo exemplo que carregam. Agradeço também a Jardel, pelo direcionamento e pelas orientações ao longo dessa jornada.

Ao meu grupo de amigos da UFRPE, que foram muito mais do que companheiros de curso. À Flávio, Maria Eduarda, Lucas, Webson, Juliana, Giulia e Williane, por tantos momentos vividos, pelo apoio mútuo e pelas experiências que tornaram essa caminhada mais leve e significativa.

A todos os amigos que fiz na Companhia Pernambucana de Saneamento, agradeço pela oportunidade de aprendizado e crescimento profissional. Em especial, ao engenheiro Júlio Tenório, por me apresentar ao universo da hidrologia e contribuir para minha formação técnica, e à minha confidente de estágio, Daniella Andrade, pelo apoio, parceria e amizade.

A todos os professores da graduação, agradeço pela dedicação e pelos conhecimentos compartilhados. Em especial, ao professor Vicente de Paulo, meu orientador, por acreditar na minha trajetória acadêmica, pelo incentivo constante, pela disponibilidade e pelas valiosas contribuições.

Às minhas amigas que, mesmo à distância, estiveram presentes com palavras de apoio, incentivo e carinho ao longo desse período.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta etapa da minha formação acadêmica.

RESUMO

O aumento da frequência e da intensidade de eventos pluviométricos extremos, associado ao avanço da urbanização e à impermeabilização do solo, tem intensificado a ocorrência de inundações em bacias urbanas. Nesse contexto, este Projeto Final de Curso teve como objetivo analisar o comportamento hidrológico e hidrodinâmico da Bacia Hidrográfica do Sítio dos Pintos, no município do Recife (PE), frente à ocorrência de eventos extremos de precipitação, considerando diferentes condições de escoamento antecedente, por meio da aplicação de modelos de simulação. A metodologia integrou técnicas de geoprocessamento, modelagem hidrológica com o software HEC-HMS, por meio do método Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN), e modelagem hidrodinâmica com o HEC-RAS. As chuvas de projeto foram estimadas a partir das curvas Intensidade–Duração–Frequência (IDF) do Manual de Drenagem e Manejo das Águas Pluviais do Recife e distribuídas temporalmente pelo método de Huff. Foram simulados 12 cenários, combinando quatro tempos de retorno (5, 25, 50 e 100 anos) e três condições antecedentes de escoamento (seca, média e úmida). Os resultados evidenciaram elevada sensibilidade da bacia às condições iniciais de umidade do solo, com incrementos significativos das vazões de pico e da extensão das áreas inundadas à medida que a condição antecedente evolui de seca para úmida. Observou-se, ainda, que eventos com menores tempos de retorno, quando associados à condição antecedente úmida, podem produzir respostas hidrológicas mais severas do que eventos de maior tempo de retorno sob condição seca. As simulações hidrodinâmicas confirmaram a ampliação das áreas inundadas e o aumento das profundidades de alagamento nos cenários mais críticos. Conclui-se que, embora a bacia apresente configuração morfométrica naturalmente pouco suscetível a cheias rápidas, o elevado grau de impermeabilização intensifica significativamente sua resposta hidrológica. Verifica-se que a umidade antecedente do solo constitui fator determinante na amplificação das vazões de pico e na expansão das áreas inundadas, podendo exercer influência comparável ou até superior ao próprio tempo de retorno. Os resultados reforçam a importância da consideração de múltiplos cenários hidrológicos no planejamento urbano e na gestão da drenagem em bacias urbanas sujeitas a eventos extremos.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica; Modelagem hidrodinâmica; Inundações urbanas; Condição antecedente de escoamento; HEC-HMS; HEC-RAS.

ABSTRACT

The increasing frequency and intensity of extreme rainfall events, combined with urban expansion and soil impermeabilization, have intensified the occurrence of flooding in urban watersheds. In this context, this Final Course Project aimed to analyze the hydrological and hydrodynamic behavior of the Sítio dos Pintos Watershed, located in Recife, Pernambuco, Brazil, under extreme rainfall events, considering different antecedent moisture conditions through the application of simulation models. The methodology integrated geoprocessing techniques, hydrological modeling using HEC-HMS based on the Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) method, and hydrodynamic modeling with HEC-RAS. Design storms were estimated from the local Intensity–Duration–Frequency (IDF) curves provided by the Recife Urban Drainage Manual and temporally distributed using the Huff method. A total of 12 scenarios were simulated, combining four return periods (5, 25, 50, and 100 years) and three antecedent moisture conditions (dry, average, and wet). The results revealed a high sensitivity of the watershed to initial soil moisture conditions, with significant increases in peak discharge and flooded areas as antecedent conditions shifted from dry to wet. It was observed that lower return period events under wet antecedent conditions may produce more severe hydrological responses than higher return period events under dry conditions. Hydrodynamic simulations confirmed the expansion of flooded areas and increased water depths under critical scenarios. It is concluded that, although the watershed presents a morphometric configuration naturally less prone to rapid flooding, the high degree of soil impermeabilization significantly intensifies its hydrological response. Antecedent soil moisture was identified as a determining factor in amplifying peak flows and flood extent, exerting influence comparable to or even greater than that of the return period itself. These findings highlight the importance of incorporating multiple hydrological scenarios into urban planning and drainage management in urban basins subject to extreme rainfall events.

Keywords: Hydrological modeling; Hydrodynamic modeling; Urban flooding; Antecedent runoff conditions; HEC-HMS; HEC-RAS.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARC I – Condição Antecedente de Escoamento Seca (Antecedent Runoff Condition I)

ARC II – Condição Antecedente de Escoamento Média (Antecedent Runoff Condition II)

ARC III – Condição Antecedente de Escoamento Úmida (Antecedent Runoff Condition III)

ARIE – Área de Relevante Interesse Ecológico

CN – Curve Number

IDF – Intensidade–Duração–Frequência

LiDAR – Light Detection and Ranging

MDT – Modelo Digital de Terreno

PE3D – Pernambuco Tridimensional

QGIS – Quantum Geographic Information System

RPA – Região Político-Administrativa

SCS – Soil Conservation Service

SCS-CN – Soil Conservation Service – Curve Number

TR – Tempo de Retorno

USDA – United States Department of Agriculture

HEC-HMS – Hydrologic Modeling System (Hydrologic Engineering Center)

HEC-RAS – River Analysis System (Hydrologic Engineering Center)

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição temporal da precipitação pelo método de Huff (1º quartil) para o $Tr = 5$ anos.....	37
Gráfico 2 - Distribuição temporal da precipitação pelo método de Huff (1º quartil) para o $Tr = 25$ anos.....	37
Gráfico 3 - Distribuição temporal da precipitação pelo método de Huff (1º quartil) para o $Tr = 50$ anos.....	38
Gráfico 4 - Distribuição temporal da precipitação pelo método de Huff (1º quartil) para o $Tr = 100$ anos.....	38
Gráfico 5 - Hidrogramas simulados no HEC-HMS para a condição antecedente seca (ARC I).	40
Gráfico 6 - Hidrogramas simulados no HEC-HMS para a condição antecedente seca (ARC II)	40
Gráfico 7 - Hidrogramas simulados no HEC-HMS para a condição antecedente seca (ARC III).....	41

FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da Bacia Sítio dos Pintos.....	33
Figura 2 - Mapa de uso e cobertura do solo para bacia Sítio dos Pintos.....	35
Figura 3 - Geometria hidráulica utilizada na modelagem do software HEC-RAS.....	45
Figura 4 - Manchas de inundação para diferentes tempos de retorno em condição antecedente de escoamento úmida (ARCIII).....	46
Figura 5 - Manchas de inundação em diferentes condições de escoamento antecedente para o $Tr = 100$ anos.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Índices geométricos utilizados para bacia Sítio dos Pintos.....	25
Tabela 2 - Produtos globais e suas respectivas condições antecedentes de escoamento.....	27
Tabela 3 - Cenários simulados para diferentes tempos de retorno e condições de escoamento antecedente.....	32
Tabela 4 - Intensidades médias (i) e precipitações totais (P. total) estimadas a partir da curva IDF para diferentes tempos de retorno.....	36
Tabela 5 - Resumo das simulações hidrológicas efetuadas no HEC-HMS.....	41
Tabela 6 - Coeficiente de Manning atribuído a cada classe de uso e cobertura do solo presente na Bacia Sítio dos Pintos.....	44

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. REVISÃO DA LITERATURA	18
1.1 Mudanças climáticas e intensificação de eventos extremos de precipitação	18
1.2 Urbanização, impermeabilização do solo e resposta hidrológica das bacias	19
1.3 Hidrologia urbana e fundamentos da modelagem hidrológica	20
1.4 Condição de escoamento antecedente e geração de vazões	21
1.5 Modelagem hidrodinâmica e análise de inundações	22
1.6 Bacias urbanas, áreas protegidas e impactos socioambientais	23
3. OBJETIVOS	24
4. METODOLOGIA	25
4.1. Área de estudo	25
4.2. Delimitação e características da sub-bacia	26
4.3. Modelagem hidrológica	26
4.4. Modelagem hidrodinâmica	29
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
5.1. Delimitação e características da sub-bacia	33
5.2. Modelagem hidrológica	35
5.3. Modelagem hidrodinâmica	44
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
7. REFERÊNCIAS	53
8. ANEXOS	58

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas vêm alterando de forma significativa os regimes de precipitação em diferentes regiões do mundo, refletindo-se no aumento da frequência e da intensidade de eventos pluviométricos extremos. No Brasil, diversos estudos apontam tendências de intensificação da ocorrência de chuvas extremas, associadas a mudanças na distribuição temporal e espacial da precipitação, o que tem ampliado os eventos de enchentes e outros impactos hidrológicos, sobretudo em áreas urbanas (Da Costa et al., 2025). Esse cenário impõe novos desafios à gestão dos recursos hídricos, exigindo abordagens capazes de representar de forma adequada a resposta das bacias hidrográficas frente a eventos extremos.

Em ambientes urbanos, os impactos das chuvas intensas são potencializados pelo processo de urbanização, caracterizado pela substituição de superfícies naturais por áreas impermeáveis, como vias pavimentadas e edificações. Esse processo interfere diretamente no ciclo hidrológico, reduzindo a infiltração, o armazenamento no solo e o tempo de concentração da bacia, ao mesmo tempo em que aumenta o volume e a velocidade do escoamento superficial (Chen et al., 2017; LI et al., 2024). Como consequência, bacias urbanas tendem a apresentar respostas hidrológicas mais rápidas e intensas, com elevação dos picos de vazão e maior suscetibilidade a inundações durante eventos de chuva extrema.

As curvas Intensidade–Duração–Frequência (IDF) consistem em relações estatísticas que associam a intensidade máxima de precipitação à sua duração e ao respectivo período de retorno, sendo de grande importância para a análise e revisão de eventos de chuvas extremas. A partir da avaliação de séries históricas pluviométricas, essas curvas permitem estimar a magnitude de precipitações associadas a diferentes probabilidades de ocorrência, subsidiando a reavaliação de cenários críticos e a atualização de parâmetros hidrológicos em estudos de drenagem (TUCCI, 2013). Nesse contexto, as curvas IDF constituem a base para a definição das chamadas chuvas de projeto, que representam eventos sintéticos utilizados no dimensionamento e na verificação de desempenho de sistemas de drenagem e controle de cheias (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988).

Nesse contexto, a hidrologia urbana assume um papel fundamental na compreensão dos processos que controlam a geração de escoamento e a ocorrência de cheias. Segundo Tucci (2012), a hidrologia aplicada em áreas urbanizadas deve considerar as profundas alterações impostas ao sistema natural, uma vez que a impermeabilização do solo, a ocupação

das planícies de inundação e a modificação dos canais fluviais alteram significativamente o comportamento hidrológico das bacias. O autor destaca ainda que, diante da complexidade desses sistemas, a utilização de modelos hidrológicos torna-se indispensável para a análise e previsão de cheias, especialmente em situações nas quais os registros históricos são insuficientes para representar eventos extremos.

Entre os fatores que condicionam a resposta hidrológica de uma bacia, a condição de escoamento antecedente, relacionada ao grau de umidade do solo antes da ocorrência da chuva, exerce influência direta sobre a geração do escoamento superficial. Solos previamente úmidos ou saturados tendem a apresentar menor capacidade de infiltração, favorecendo maiores volumes de escoamento e picos de vazão mais elevados para um mesmo evento pluviométrico (Ran et al., 2022; Staudinger et al., 2025). Conforme ressaltado por Tucci e Bertoni (2003), a consideração das condições iniciais da bacia é essencial para a simulação de cheias, uma vez que a umidade antecedente pode intensificar significativamente a resposta hidrológica durante eventos extremos.

A Bacia Hidrográfica do Sítio dos Pintos, localizada na zona norte do Recife (PE), insere-se nesse contexto de complexidade hidrológica, caracterizando-se como uma bacia urbana intensamente ocupada, na qual os processos de impermeabilização do solo e as modificações na drenagem natural contribuem para aumento da vulnerabilidade a eventos de inundação. Além disso, a bacia encontra-se inserida à Área de Proteção Ambiental Sítio dos Pintos (Leis municipais, 2020) e à Área de Relevante Interesse Ecológico (ARIE), associada ao entorno do Parque Estadual de Dois Irmãos, um dos principais remanescentes de Mata Atlântica urbana da cidade. A ocorrência de eventos extremos nessa região pode acarretar impactos não apenas sobre a infraestrutura urbana, mas também sobre a biodiversidade local e os serviços ecossistêmicos associados.

Diante desse cenário, a simulação hidrológica e hidrodinâmica destaca-se como uma ferramenta essencial para a compreensão e a previsão do comportamento da bacia frente a chuvas extremas. A modelagem hidrológica permite representar o processo chuva–escoamento, estimando as vazões geradas a partir de diferentes cenários pluviométricos e condições de umidade antecedente, enquanto a modelagem hidrodinâmica possibilita analisar a propagação dessas vazões ao longo dos cursos d'água e áreas adjacentes, identificando zonas suscetíveis à inundação, profundidades e velocidades do escoamento (Guasselli et al., 2016; Chaves, 2023). De acordo com Tucci (2012), a integração entre

modelos e conceitos hidrológicos consolidados amplia a capacidade preditiva dos estudos, fornecendo subsídios técnicos fundamentais para o planejamento urbano, a gestão de riscos e a mitigação dos impactos associados a eventos extremos.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Mudanças climáticas e ferramentas da hidrologia

As mudanças climáticas têm provocado alterações significativas nos padrões hidrometeorológicos em escala global, refletindo-se, de forma particular, na intensificação da frequência e da magnitude de eventos extremos de precipitação. Diversos estudos indicam que o aumento da temperatura média do ar influencia diretamente a capacidade da atmosfera de reter vapor d'água, favorecendo episódios de chuvas mais intensas e concentradas no tempo (Allan; Soden, 2008; IPCC, 2021). No contexto brasileiro, essas alterações têm sido associadas ao aumento da ocorrência de enchentes e inundações, especialmente em regiões urbanizadas, onde a resposta hidrológica das bacias tende a ser mais rápida e intensa (Costa et al., 2025).

No Nordeste brasileiro, embora exista elevada variabilidade climática natural, estudos recentes apontam tendências de intensificação de eventos extremos de chuva, mesmo em regiões historicamente marcadas por períodos de estiagem prolongada (Marengo; Torres; Alves, 2017). Essas mudanças impõem desafios adicionais à gestão dos recursos hídricos e ao planejamento urbano, uma vez que eventos intensos e concentrados tendem a exceder a capacidade dos sistemas de drenagem existentes, ampliando os riscos hidrológicos e socioambientais.

As curvas Intensidade–Duração–Frequência (IDF) constituem uma das principais ferramentas da hidrologia aplicada para a caracterização de chuvas intensas e para o dimensionamento de obras de drenagem urbana. Essas curvas estabelecem a relação entre a intensidade média da precipitação, sua duração e a probabilidade de ocorrência associada a um determinado tempo de retorno, permitindo a estimativa de chuvas de projeto representativas de eventos extremos (Chow; Maidment; Mays, 1988; Tucci, 2012).

No contexto urbano, a utilização das curvas IDF assume papel ainda mais relevante, uma vez que a intensificação da urbanização e a consequente impermeabilização do solo tornam as bacias mais sensíveis a chuvas de curta duração e elevada intensidade. Nessas condições, eventos pluviométricos concentrados em intervalos reduzidos de tempo tendem a gerar respostas hidrológicas rápidas, com aumento expressivo das vazões de pico e maior suscetibilidade à ocorrência de alagamentos e inundações (Tucci, 2012; Canholi, 2014).

Além disso, as curvas IDF são amplamente empregadas como base para a construção de chuvas sintéticas, as quais permitem representar, de forma probabilística, eventos extremos com diferentes níveis de severidade. Essas chuvas de projeto são fundamentais para estudos de simulação hidrológica e hidrodinâmica, pois fornecem condições controladas para a avaliação do comportamento das bacias frente a cenários críticos de precipitação (Chow; Maidment; Mays, 1988). A correta definição das intensidades associadas a diferentes tempos de retorno é, portanto, essencial para a previsão de impactos hidrológicos e para o planejamento de sistemas de drenagem urbana resilientes.

Diante do atual contexto de mudanças climáticas, diversos estudos indicam uma tendência de aumento na frequência e na intensidade dos eventos extremos de precipitação, o que reforça a importância da atualização e da aplicação criteriosa das curvas IDF em estudos hidrológicos (WILBY; KEENAN, 2012; IPCC, 2021). Nesse cenário, a adoção de curvas IDF locais, ajustadas às características climáticas regionais, torna-se indispensável para a adequada previsão de eventos extremos e para a redução da vulnerabilidade de áreas urbanas a desastres hidrológicos.

2.2. Urbanização, impermeabilização do solo e resposta hidrológica das bacias

O processo de urbanização é reconhecido como um dos principais fatores antrópicos responsáveis pela alteração da dinâmica hidrológica das bacias hidrográficas. A substituição de áreas naturais por superfícies impermeáveis, como pavimentos e edificações, reduz significativamente a infiltração da água no solo e o armazenamento superficial, aumentando o volume e a velocidade do escoamento superficial (Tucci, 2012; Chen et al., 2017).

Em bacias urbanas, essas modificações resultam em redução do tempo de concentração e elevação dos picos de vazão, tornando os sistemas mais suscetíveis à ocorrência de inundações durante eventos de chuva intensa. Além disso, intervenções diretas nos cursos d'água, como canalizações e retificações, comprometem a capacidade natural de amortecimento das cheias, intensificando os impactos hidrológicos associados à urbanização (Li et al., 2024; Tucci; Bertoni, 2003).

2.3. Hidrologia urbana e fundamentos da modelagem hidrológica

A hidrologia urbana dedica-se ao estudo dos processos hidrológicos em bacias fortemente modificadas pela ação antrópica, nas quais o comportamento natural do ciclo hidrológico é substancialmente alterado. Segundo Tucci (2012), a compreensão desses processos é fundamental para o planejamento e a gestão de sistemas de drenagem urbana, bem como para a avaliação de riscos associados a eventos extremos.

Nesse contexto, a modelagem hidrológica surge como uma ferramenta indispensável, permitindo a representação matemática do processo chuva–escoamento e a simulação do comportamento hidrológico da bacia sob diferentes condições. Modelos hidrológicos possibilitam avaliar cenários de precipitação, uso e ocupação do solo e condições iniciais, fornecendo estimativas de vazão que subsidiam estudos de controle de cheias e planejamento urbano (Guasselli et al., 2016; Araújo et al., 2024).

A simulação hidrológica baseia-se na aplicação de métodos que buscam representar, de forma simplificada, os processos físicos envolvidos na transformação da precipitação em escoamento superficial. Entre os métodos mais difundidos na literatura, destaca-se o método do Soil Conservation Service (SCS), atualmente denominado Natural Resources Conservation Service (NRCS), amplamente utilizado para a estimativa do escoamento direto a partir da chuva. Esse método fundamenta-se no conceito do Curve Number (CN), parâmetro que relaciona o uso e ocupação do solo, o tipo de solo e a condição de umidade antecedente, permitindo avaliar como diferentes cenários influenciam a geração de escoamento (USDA-SCS, 1985; Tucci, 2012).

O método SCS-CN apresenta ampla aplicação em estudos hidrológicos, especialmente em bacias de pequeno e médio porte, devido à sua simplicidade, baixo número de parâmetros e boa capacidade de representação da resposta hidrológica em diferentes condições de umidade antecedente. Diversos autores destacam sua eficiência na análise de eventos de chuva intensa, sobretudo quando associado a cenários de urbanização e mudanças no uso do solo, características comuns em bacias urbanas (Mishra; Singh, 2005; Ponce; Hawkins, 1996).

Além dos métodos conceituais, a evolução dos recursos computacionais possibilitou o desenvolvimento de softwares específicos para a simulação hidrológica, os quais integram diferentes métodos de cálculo e permitem a análise de múltiplos cenários. Entre os programas

mais utilizados internacionalmente, destacam-se o HEC-HMS, o SWMM, o MIKE SHE e o SWAT, cada um com diferentes níveis de complexidade e aplicações específicas (Tucci, 2012).

O Hydrologic Modeling System (HEC-HMS), desenvolvido pelo U.S. Army Corps of Engineers, é um dos softwares mais difundidos para simulação hidrológica, sendo amplamente empregado em estudos de cheias, planejamento de drenagem e análise de eventos extremos. O HEC-HMS permite a modelagem do processo chuva–vazão por meio da combinação de diferentes métodos para perdas, transformação do escoamento, fluxo de base e roteamento em canais, incluindo o método SCS para estimativa do escoamento direto. Sua flexibilidade e interface intuitiva tornam o software especialmente adequado para estudos em bacias urbanas e rurais, além de possibilitar a avaliação de cenários com diferentes condições de escoamento antecedente (USACE, 2021).

Estudos indicam que a aplicação do HEC-HMS apresenta resultados satisfatórios na simulação de vazões de pico e hidrogramas em eventos de chuva intensa, sendo amplamente validado em diferentes contextos hidrológicos, inclusive em bacias urbanas brasileiras. A integração do HEC-HMS com modelos hidrodinâmicos, como o HEC-RAS, amplia ainda mais o potencial de análise, permitindo avaliar não apenas a geração das vazões, mas também sua propagação e os impactos associados a inundações (Silva, 2015; Chaves, 2023).

2.4. Condição de escoamento antecedente e geração de vazões

A condição de escoamento antecedente, relacionada ao grau de umidade do solo antes da ocorrência de um evento pluviométrico, é um dos fatores mais relevantes na determinação da resposta hidrológica de uma bacia. Solos previamente úmidos ou saturados apresentam menor capacidade de infiltração, favorecendo o aumento do escoamento superficial e a elevação dos picos de vazão (Ran et al., 2022).

Estudos indicam que a influência da umidade antecedente pode ser comparável ou até superior à intensidade da precipitação na geração de cheias, especialmente em eventos extremos. Conforme destacado por Tucci e Bertoni (2003), a consideração das condições iniciais da bacia é essencial para a simulação realista de cheias, uma vez que a saturação do solo potencializa a resposta hidrológica e intensifica os impactos associados a chuvas intensas (Staudinger et al., 2025).

Com o avanço de dados geoespaciais globais, surgiu a necessidade de produtos que possam integrar mapas de uso do solo e propriedades de solo em escalas continentais e globais, mantendo coerência hidrológica. É nesse contexto que se inserem esforços como o GCN250 — um *dataset* global de números de curva gerados em grade com resolução de ~250 m, resultante da combinação de mapas globais de cobertura terrestre (ESA CCI-LC) e mapas de grupos hidrológicos de solo (HYSOGs250m) (Jaafar et al., 2019).

Esse produto tem um papel relevante porque permite quantificar CN de forma padronizada para diferentes condições antecedentes de umidade do solo (ARCI — seco, ARCII — médio, ARCIII — úmido) (Jaafar et al., 2019).

A aplicabilidade do produto global GCN250 tem sido evidenciada em estudos que o utilizam como base para a definição do *Curve Number* em análises hidrológicas (Jaafar et al., 2019; Villanueva e Vidaurre, 2025). Nesse contexto, o uso do GCN250 mostra-se valioso para uma ampla gama de aplicações relacionadas à água, incluindo projeto hidrológico, gestão do uso do solo, alocação de recursos hídricos e avaliação do risco de inundações, conforme destacado por Yang et al. (2025).

2.5. Modelagem hidrodinâmica e análise de inundações

A modelagem hidrodinâmica complementa a simulação hidrológica ao permitir a análise da propagação do escoamento ao longo de cursos d'água, canais e áreas de inundação. Por meio de modelos hidrodinâmicos, é possível estimar variáveis como profundidade, velocidade do fluxo e extensão das áreas inundadas, informações fundamentais para a avaliação de riscos e para a elaboração de mapas de perigo de inundação (Verçosa, 2019; Chaves, 2023).

Diferentemente dos modelos hidrológicos, que estimam a geração das vazões a partir da precipitação, os modelos hidrodinâmicos descrevem o comportamento do escoamento com base nas equações de conservação da massa e da quantidade de movimento, geralmente representadas pela equação da energia em abordagens unidimensionais (1D) (Malla; Ohgushi, 2025).

A integração entre modelagem hidrológica e hidrodinâmica amplia a capacidade preditiva dos estudos, especialmente em bacias urbanas sujeitas a eventos extremos, permitindo avaliar diferentes cenários de chuva e condições de escoamento antecedente. Essa abordagem integrada tem sido amplamente utilizada como suporte à tomada de decisão, contribuindo para o planejamento urbano sustentável e para a mitigação dos impactos socioambientais associados às inundações (Guasselli et al., 2016; Chaves, 2023).

Diversos softwares têm sido amplamente utilizados para esse tipo de simulação, destacando-se o HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System), desenvolvido pelo U.S. Army Corps of Engineers. O HEC-RAS permite a modelagem hidrodinâmica em 1D e 2D, sendo amplamente empregado em estudos de cheias, mapeamento de áreas inundáveis e avaliação de cenários de intervenções hidráulicas. Sua ampla difusão na literatura científica deve-se, entre outros fatores, à robustez conceitual, à disponibilidade gratuita e à integração com sistemas de informações geográficas, o que facilita a representação espacial dos resultados em bacias urbanas (Brunner, 2016).

2.6. Bacias urbanas, áreas protegidas e impactos socioambientais

Bacias hidrográficas urbanas inseridas em áreas ambientalmente sensíveis apresentam desafios adicionais no contexto da gestão de riscos hidrológicos. A proximidade entre áreas densamente urbanizadas e unidades de conservação pode intensificar conflitos entre a ocupação do solo e a preservação ambiental, sobretudo durante a ocorrência de eventos extremos (Cabral et al., 2014).

Do ponto de vista ambiental, a ocorrência de inundações em áreas urbanas está associada à degradação da qualidade da água, uma vez que o escoamento superficial mobiliza sedimentos, resíduos sólidos, contaminantes urbanos e efluentes não tratados, promovendo a poluição de cursos d'água e comprometendo ecossistemas aquáticos (PAUL; MEYER, 2001; WALSH et al., 2005).

No que diz respeito a ótica social, os eventos extremos podem impactar de maneira mais severa áreas ocupadas de forma informal, frequentemente localizadas em fundos de vale, margens de rios e encostas, onde a exposição ao risco hidrológico é elevada e a infraestrutura urbana é insuficiente. Em casos como esses, as inundações resultam em perdas materiais

recorrentes, deslocamento de famílias, comprometimento da mobilidade urbana e riscos à saúde pública, reforçando ciclos de vulnerabilidade socioambiental (DOUGLAS et al., 2008).

Além disso, os danos causados por inundações urbanas associadas a chuvas extremas implicam elevados custos econômicos e institucionais, exigindo investimentos contínuos em resposta emergencial, reconstrução e manutenção de sistemas de drenagem (WILBY; KEENAN, 2012; KUNDZEWICZ et al., 2014)

No caso da bacia do Sítio dos Pintos, a inserção no entorno da Área de Relevante Interesse Ecológico confere maior complexidade ao sistema, uma vez que eventos de inundação podem afetar tanto a infraestrutura urbana quanto a biodiversidade local e os serviços ecossistêmicos, como a regulação hídrica e a manutenção da qualidade ambiental (Medeiros, 2022). Assim, estudos que integrem a análise hidrológica e hidrodinâmica tornam-se fundamentais para subsidiar estratégias de conservação ambiental e gestão sustentável do território.

3. OBJETIVOS

3.1. Geral

Analisar o comportamento hidrológico e hidrodinâmico da Bacia Hidrográfica do Sítio dos Pintos, no município do Recife (PE), frente à ocorrência de eventos extremos de precipitação, considerando diferentes condições de escoamento antecedente, por meio da aplicação de modelos de simulação.

3.2. Específicos

- Delimitar bacia hidrográfica do Sítio dos Pintos e avaliar aspectos como uso e ocupação do solo e grau de impermeabilização;
- Aplicar a modelagem hidrológica para a simulação da transformação chuva–vazão em eventos extremos de precipitação;
- Analisar a influência das condições de escoamento antecedente na resposta hidrológica da bacia, avaliando cenários de diferentes níveis de umidade do solo;
- Simular a propagação das vazões geradas em um trecho da bacia por meio da modelagem hidrodinâmica, visando a análise do comportamento do escoamento nos cursos d'água e áreas potencialmente inundáveis.

4. METODOLOGIA

4.1. Área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Riacho Sítio dos Pintos localiza-se no bairro homônimo, situado na zona norte do município do Recife (PE), integrando a Região Político-Administrativa III (RPA-3). O bairro possui população estimada em cerca de 7.276 habitantes e área aproximada de 180 ha, fazendo limite com os bairros Dois Irmãos e Caxangá, além do município de Camaragibe (Recife, s.d.; Silva; Verardi, 2017).

O riacho Sítio dos Pintos constitui um curso d'água urbano, afluente do rio Camaragibe, o qual integra a bacia hidrográfica do rio Capibaribe, desempenhando papel relevante na dinâmica hídrica local (Cabral et al., 2018; Cabral et al., 2020). A bacia hidrográfica associada ao riacho apresenta área aproximada de 102,8 ha e extensão do curso principal em torno de 1,7 km, sendo marcada por relevo suavemente ondulado e forte influência da urbanização sobre os processos hidrológicos naturais, especialmente em função da impermeabilização do solo e das modificações na drenagem original (Cabral et al., 2018).

O clima da região metropolitana do Recife é classificado como tropical úmido, segundo a classificação climática de Köppen, caracterizado por elevadas temperaturas e precipitações concentradas ao longo do ano, fatores que influenciam diretamente os processos hidrológicos e o comportamento do escoamento superficial na bacia estudada (Alvares et al., 2013). O relevo da área é predominantemente suave ondulado, típico das porções urbanizadas do litoral pernambucano, condicionando a resposta hidrológica da bacia e a propagação de cheias em eventos de precipitação intensa.

4.2. Delimitação e características da sub-bacia

O arquivo foi disponibilizado em formato TIFF, para garantir a compatibilidade espacial com as demais bases cartográficas e a precisão nas etapas de processamento hidrológico, o MDT foi reprojeto para o sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM), datum SIRGAS 2000, zona 25S, correspondente à área de estudo. As rotinas de modelagem hidrológica foram efetuadas em ambiente SIG e incluíram a remoção de depressões espúrias, a geração dos segmentos de fluxo, o cálculo das direções de drenagem e a determinação da área de contribuição da bacia.

Complementarmente, foram calculados alguns índices geométricos acerca da forma da bacia, como o coeficiente de compacidade, o fator de forma, o índice de circularidade e o índice de sinuosidade (Tabela 1).

Tabela 1 - Índices geométricos utilizados para bacia Sítio dos Pintos

Índice	Fórmula	Descrição
Coeficiente de compacidade (Kc)	$Kc = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{A}}$	Onde: P é o perímetro da bacia e A é a área da bacia.
Fator de forma (Kf)	$Kf = \frac{A}{L^2}$	Onde: A é a área da bacia e L é o comprimento axial da bacia.
Índice de circularidade (IC)	$IC = \frac{12,57 \times A}{P^2}$	Onde: P é o perímetro da bacia e A é a área da bacia.
Índice de sinuosidade (Is)	$Is = \frac{Lc}{Lv}$	Onde: Lc é o comprimento real do canal e Lv é a distância vetorial entre nascente e foz.

Fonte: A autora, 2025.

4.3. Modelagem hidrológica

A modelagem hidrológica foi realizada utilizando o HEC-HMS (Hydrologic Modeling System), desenvolvido pelo U.S. Army Corps of Engineers, reconhecido internacionalmente por sua capacidade de simular eventos de chuva–escoamento em bacias hidrográficas. Para a estimativa das perdas, adotou-se o método SCS Curve Number, desenvolvido pelo *Soil Conservation Service* (SCS), atualmente denominado *Natural Resources Conservation Service* (NRCS), enquanto a transformação chuva–vazão foi representada por meio do Hidrograma Unitário do SCS.

O método de perdas adotado relaciona a precipitação total ao escoamento direto, considerando as características do solo, o uso e a cobertura do solo, bem como a condição de umidade antecedente da bacia. A equação fundamental que rege o método é apresentada a seguir:

$$Q = \frac{(p - 0,2S)^2}{P + 0,8S}, \text{ para } P > 0,2S \quad \text{Eq. (1)}$$

$$Q = 0, \text{ para } P \leq 0,2S$$

Onde:

Q = Lâmina de escoamento superficial direto (mm);

P = Precipitação total (mm),

S = Armazenamento potencial de água no solo (mm), calculado por:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Eq. (2)}$$

Os dados de entrada do modelo compreenderam a área total da bacia, a fração de área impermeável, o valor médio do *Curve Number* representativo das condições de uso e ocupação do solo, o *lag time* do escoamento, além do hietograma de projeto definido para cada período de retorno analisado.

A fração de área impermeável da bacia em questão foi definida a partir da análise visual em ambiente SIG, seguida da criação de feições representativas para o uso e cobertura do solo da área de interesse, com base em imagens do *Google Satellite 2025*.

O valor do *Curve Number* (CN) adotado neste estudo será baseado no produto global GCN250 (*Global Hydrologic Curve Number*). O trabalho de Jaafar et al. (2019) apresenta o GCN250 como um conjunto de dados resolução espacial aproximada de 250 m que foi desenvolvido a partir de informações globais de cobertura do solo (300 m) e de solos (250 m), sendo disponibilizado no sistema de coordenadas geográficas com datum WGS84, no formato GeoTIFF. Adicionalmente, foi utilizado o conjunto de dados HYSOGs250m, que fornece a classificação global dos solos em quatro grupos hidrológicos (A, B, C e D), associados à sua capacidade de infiltração e à textura do solo.

Os valores de CN do referido produto variam em função das condições antecedentes de escoamento (*Antecedent Runoff Conditions – ARC*), as quais são influenciadas pela intensidade e duração da precipitação, precipitação acumulada, condições de umidade do solo, densidade da cobertura vegetal, estágio de crescimento e temperatura. Dessa forma, o produto

GCN250 disponibiliza mapas numéricos de CN para três condições de escoamento: seco (ARCI), médio (ARCII) e úmido (ARCIII), sendo simulados, neste trabalho, os três cenários para cada tempo de retorno analisado (Tabela 2).

Tabela 2 - Produtos globais e suas respectivas condições antecedentes de escoamento

Produto global	Condição antecedente de escoamento
GCN250-ARCI	Seco
GCN250-ARCII	Médio
GCN250-ARCIII	Úmido

Fonte: Os Autores,, 2025.

O tempo de concentração da bacia será estimado por meio da fórmula empírica de Carter (Equação 3). Conforme discutido por Silveira (2005), a equação de Carter apresenta desempenho satisfatório dentro de sua faixa de aplicação, fornecendo resultados coerentes quando comparada a outras formulações empíricas. Adicionalmente, Fernandes e Pizzo (2025) destacam que essa equação produz estimativas compatíveis com métodos de referência, sendo especialmente indicada para microbacias declivosas e de forma alongada.

$$TC = 0,0977 * L^{0,6} * S^{-0,3} \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde:

L = Comprimento do talvegue principal (m); e

S = Declividade média do talvegue (m/m).

As vazões de projeto foram estimadas para tempos de recorrência de 5, 25, 50 e 100 anos, com base na equação IDF do Recife–PE (Equação 4), conforme o Manual de Drenagem e Manejo das Águas Pluviais do Recife (Recife, 2014).

$$i = \frac{611,3425 * Tr^{0,1671}}{(t + 7,3069)^{0,6348}} \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde:

i = Intensidade da chuva (mm/h); Tr = Tempo de retorno (anos); e t = Duração da

chuva (min).

Os valores da chuva de projeto serão discretizados por hietogramas, sendo utilizado o método de Huff (1967) para distribuição temporal. Adotou-se o padrão do 1º quartil, por ser representativo para chuvas com duração menor que 12 horas. Segundo Abreu et al. (2017), em projetos aplicados a bacias urbanas é prática recorrente a adoção de chuvas de projeto com duração da ordem de 2 a 3 horas, distribuídas temporalmente pelo método dos Blocos Alternados ou o método de Huff, no padrão do 1º quartil. Essa configuração é especialmente adequada para estudos hidrológicos voltados à análise de cheias, uma vez que tende a produzir respostas mais críticas do escoamento superficial, conforme recomendado por Tucci (2008). A duração da chuva foi determinada como sendo igual ao tempo de concentração da bacia, em consonância com Medeiros (2022), em sua modelagem computacional de trechos da bacia Sítio dos Pintos.

4.4. Modelagem hidrodinâmica

Para a modelagem da inundação, foi utilizado o software Hydrologic Engineering Center – River Analysis System (HEC-RAS), versão 6.6, desenvolvido pelo U.S. Army Corps of Engineers, amplamente reconhecido para simulação hidrodinâmica de rios e canais. O HEC-RAS é aplicado em atividades como gestão de planícies de inundação, avaliação de risco de cheias, modelagem de sistemas fluviais e análises de desvios de canais. Entre suas principais funcionalidades, destacam-se a capacidade de representar diferentes regimes de escoamento e de identificar áreas suscetíveis a inundações, onde a cota do terreno se encontra abaixo do nível d'água calculado (Malla; Ohgushi, 2025).

No presente estudo a análise hidráulica foi realizada ao longo do trecho correspondente ao percurso do talvegue principal da bacia, sendo conduzida em condição de escoamento permanente (*steady flow*), considerando um regime misto (*mixed flow regime*), o que possibilita a representação de trechos com escoamentos subcríticos e supercríticos ao longo do canal. No HEC-RAS, o procedimento computacional básico fundamenta-se na solução da equação de energia unidimensional (Equação 5), aplicada entre seções transversais consecutivas do canal. O sistema de escoamento permanente do HEC-RAS é projetado para ser empregado em estudos de gestão de planícies de inundação e avaliação de áreas sujeitas a inundações, permitindo ainda a análise de alterações nos perfis da superfície da água decorrentes de modificações geométricas no canal ou da implantação de diques e estruturas

hidráulicas. (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2021).

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde:

Z_1, Z_2 = Cota do fundo do canal principal nas seções transversais 1 e 2;

Y_1, Y_2 = Profundidade de água nas seções transversais 1 e 2;

V_1, V_2 = Velocidades médias (vazão total/área molhada total) nas seções transversais 1 e 2;

α_1, α_2 = Coeficientes de ponderação de velocidade;

g = Aceleração da gravidade; e

h_e = Perda de carga.

As perdas de energia do modelo são contabilizadas principalmente por meio do atrito, estimado a partir da equação de Manning, e pelas perdas associadas aos efeitos de contração e expansão do escoamento, representadas por coeficientes multiplicados pela variação da altura da velocidade. Em situações nas quais o perfil da superfície da água apresenta variações rápidas, como na ocorrência de ressaltos hidráulicos, na análise hidráulica de pontes ou na avaliação de perfis em confluências de cursos d'água, o modelo recorre à equação do momento, garantindo uma representação mais adequada dessas condições (Equação 6, Equação 7 e Equação 8).

$$h_e = L \bar{S}_f + C \left(\frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right) - \left(\frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde: L = Comprimento do trecho ponderado pela vazão; \bar{S}_f = Declividade média de atrito entre duas seções; e C = Coeficiente de perda por contração ou expansão.

$$L = \frac{L_{lob} \bar{Q}_{lob} + L_{ch} \bar{Q}_{ch} + L_{rob} \bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad \text{Eq. (7)}$$

Onde:

L_{lob}, L_{ch}, L_{rob} = Comprimentos de seção transversal especificados para o fluxo na margem esquerda, no canal principal e na margem direita, respectivamente; e

$\bar{Q}_{lob}, \bar{Q}_{ch}, \bar{Q}_{rob}$ = Média aritmética das vazões entre as seções para a margem esquerda, o canal principal e a margem direita, respectivamente.

$$\bar{S}_f = \left(\frac{Q}{K} \right)^2 \quad \text{Eq. (8)}$$

$$K = \frac{1}{n} A R^{2/3}$$

Onde:

Q = Vazão; n = Coeficiente de rugosidade de Manning; A = Área molhada; e R = Raio hidráulico.

As condições de contorno do modelo hidráulico no HEC-RAS foram estabelecidas por meio da opção *Normal Depth* (profundidade normal) nos extremos do sistema fluvial. Essa condição baseia-se na aplicação de um declive de energia na equação de Manning, a partir do qual é calculada a profundidade normal em cada seção transversal. Para esse fim, o declive de energia adotado foi estimado com base na declividade média do canal, considerada representativa do trecho modelado.

Os dados de entrada do modelo compreenderam a declividade média do canal, as vazões simuladas pelo modelo HEC-HMS, o Modelo Digital do Terreno (MDT) do PE3D, o coeficiente de rugosidade de Manning e a geometria hidráulica do curso d'água. Esta última foi definida a partir do traçado do talvegue principal, das margens e do caminho de escoamento, bem como da inserção das seções transversais, as quais foram delimitadas manualmente com base na análise das cotas altimétricas e da morfologia do terreno.

Os coeficientes de rugosidade de Manning (n) são parâmetros essenciais para o modelo hidráulico, abrangendo tanto os valores relativos ao canal principal quanto às

planícies de inundação (Malla; Ohgushi, 2025). Para sua definição, foi utilizado o mapa de uso e cobertura do solo, mencionado na etapa da modelagem hidrológica, o que permite uma representação adequada das condições superficiais da área de estudo. Os valores do coeficiente de Manning atribuídos a cada classe de uso e cobertura do solo seguiram a classificação utilizada por Cea et al. (2024), apresentada em um estudo que empregou modelagem hidrológica-hidráulica para a análise das inundações.

Foram definidos 12 cenários de geração de escoamento superficial (Tabela 3), resultantes da combinação de quatro tempos de retorno (5, 25, 50 e 100 anos) com três condições de escoamento antecedente (seco, médio e úmido). Esses cenários permitiram avaliar de forma sistemática a influência conjunta da magnitude dos eventos pluviométricos e do estado de umidade do solo na resposta hidrológica e hidrodinâmica da bacia.

Tabela 3 - Cenários simulados para diferentes tempos de retorno e condições de escoamento antecedente

Cenário	Tempo de retorno	Condição antecedente
1	5 anos	Seco
2		Médio
3		Úmido
4	25 anos	Seco
5		Médio
6		Úmido
7	50 anos	Seco
8		Médio
9		Úmido
10	100 anos	Seco
11		Médio
12		Úmido

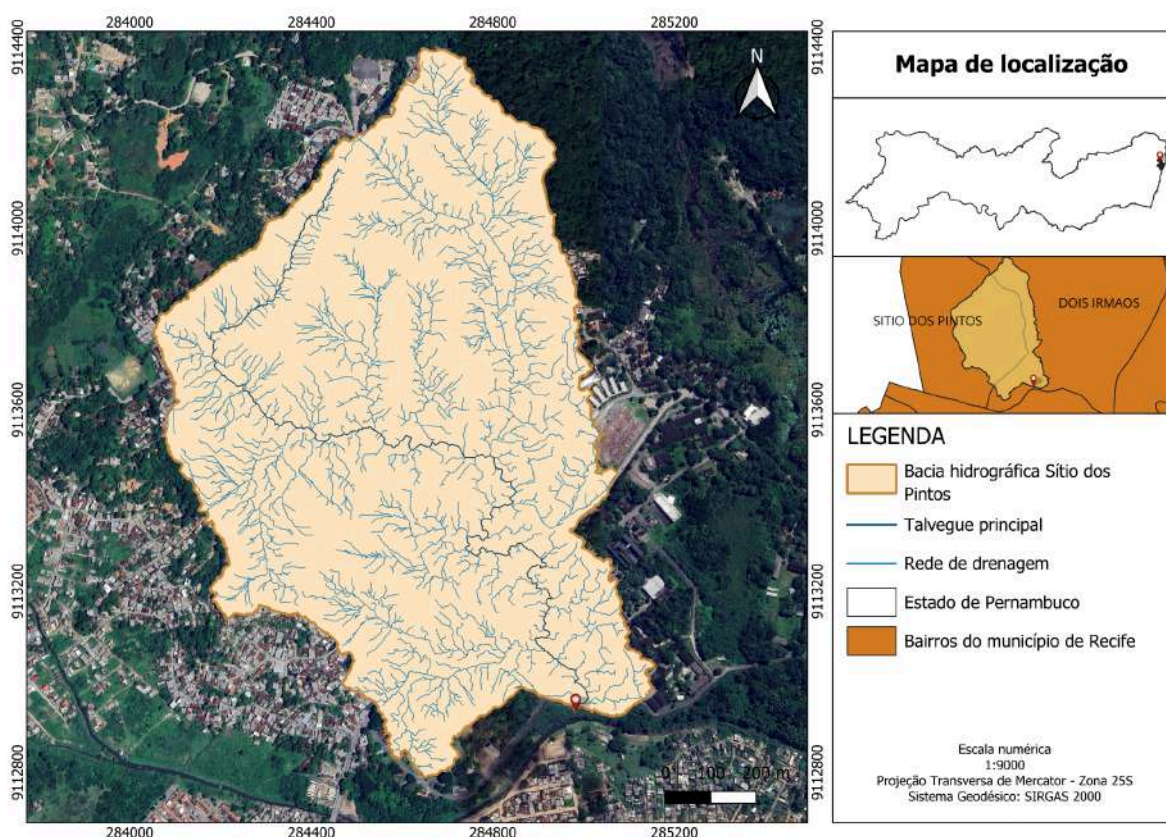
Fonte: A autora, 2025.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Delimitação e características da sub-bacia

A bacia hidrográfica do Sítio dos Pintos apresenta área de drenagem de 1,0359 km² e perímetro de 7,17 km, resultados semelhantes são ao estudo de Cabral et al. (2018), que apresenta algumas características hidrológicas para bacia Sítio dos Pintos. O comprimento do talvegue principal foi estimado em 2,87 km, enquanto a declividade média do talvegue principal resultou em 0,011 m/m, indicando um relevo suavemente inclinado ao longo do canal principal (Figura 1).

Figura 1 - Mapa da Bacia Sítio dos Pintos



Fonte: Os Autores, 2025.

O conhecimento das características da bacia hidrográfica constitui uma etapa fundamental para a compreensão de sua resposta hidrológica, uma vez que parâmetros geométricos e morfométricos exercem influência direta sobre o escoamento superficial, o

tempo de resposta às chuvas e a propensão à ocorrência de inundações (Chow; Maidment; Mays, 1988; Tucci, 2012).

O coeficiente de compactidade (K_c), cujo valor obtido foi de 1,97, indica que a bacia apresenta forma significativamente alongada, afastando-se do formato circular. Valores elevados de K_c estão associados a bacias menos compactas, nas quais o escoamento superficial tende a se distribuir ao longo do tempo, reduzindo a sincronização das contribuições e, conseqüentemente, os picos de vazão (Villela; Mattos, 1975; Tucci, 2012). Do ponto de vista hidrológico, esse valor sugere menor predisposição natural a cheias rápidas quando comparado a bacias mais compactas.

De forma coerente, o fator de forma (K_f) apresentou valor de 0,44, ou seja, mais próximo de zero, reforçando a interpretação de uma bacia alongada. Segundo Villela e Mattos (1975), bacias com baixos valores de K_f tendem a apresentar respostas hidrológicas mais distribuídas no tempo, enquanto valores elevados indicam maior tendência à concentração rápida do escoamento. Assim, o valor encontrado sugere que, sob condições naturais, a bacia não apresenta elevada propensão geométrica à geração de picos abruptos de vazão.

O índice de circularidade (I_c), igual a 0,25, confirma essa configuração alongada. Valores de I_c próximos de 1 são característicos de bacias circulares, nas quais favorecem a ocorrência de alagamentos. Por outro lado, valores reduzidos, como o observado, indicam bacias com menor propensão a eventos desse tipo (Miller, 1953; Christofolletti, 1980).

O índice de sinuosidade (I_s), com valor de 2,20, revela um canal principal bastante sinuoso. Elevados valores de sinuosidade estão associados a maiores perdas de energia ao longo do escoamento, devido ao aumento do atrito hidráulico e à maior extensão do percurso do fluxo, o que tende a reduzir velocidades médias e retardar a propagação das ondas de cheia (Tucci, 2012). Esse comportamento contribui para atenuar picos de vazão ao longo do canal, ainda que não elimine riscos de inundação em contextos urbanizados.

De maneira integrada, os índices fisiográficos indicam que a bacia, sob o ponto de vista puramente geométrico, apresenta baixa propensão natural a inundações rápidas, em função de sua forma alongada e da elevada sinuosidade do canal principal. Entretanto, conforme amplamente discutido na literatura, a resposta hidrológica de bacias urbanas é influenciada pela ocupação do solo e pelo aumento das áreas impermeáveis, fatores que podem sobrepor os controles morfométricos naturais e intensificar significativamente o

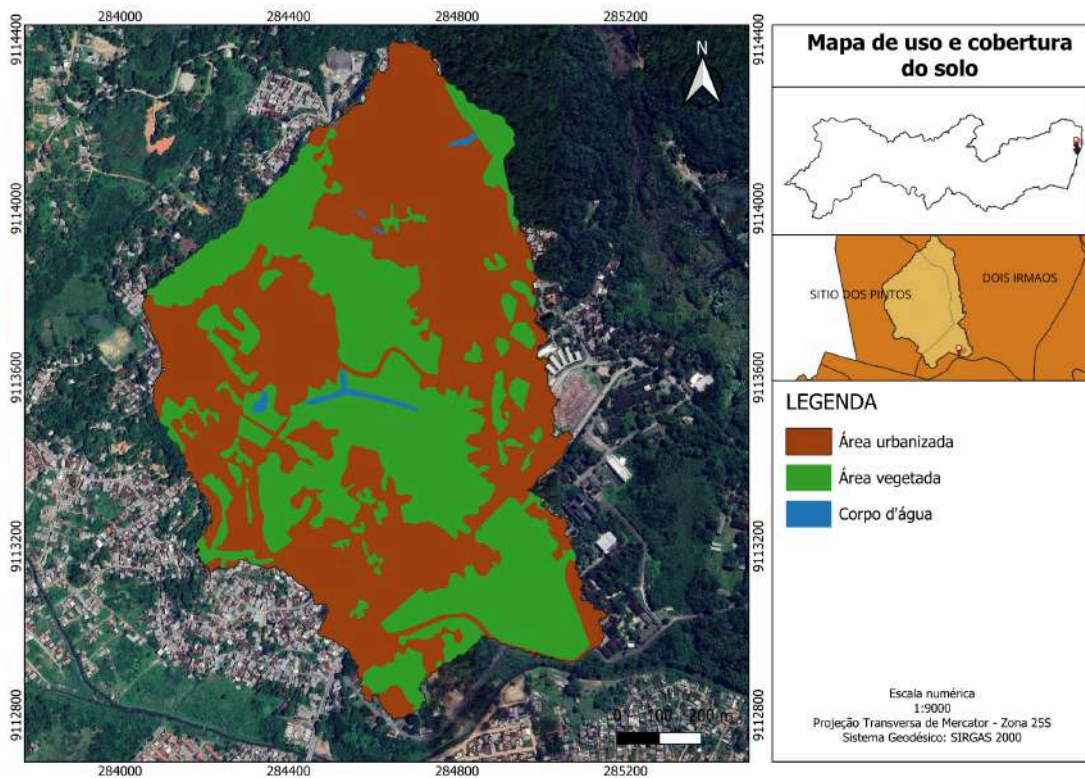
escoamento superficial (Tucci, 2012; Canholi, 2014).

5.2. Modelagem hidrológica

Por meio da análise do uso e cobertura do solo (Figura 2), estimou-se que uma porção correspondente a 43,34 % da área total da bacia encontra-se classificada como superfície impermeável, o que pode influenciar significativamente a dinâmica do escoamento superficial. Resultados semelhantes são discutidos por Cabral et al. (2018), que apontam que a elevada impermeabilização da bacia potencializa a geração de escoamento superficial direto.

Estudos hidrológicos têm demonstrado que o aumento da área impermeável reduz a infiltração da água no solo e intensifica o volume de escoamento superficial, resultando em maiores vazões de pico e respostas mais rápidas da bacia a eventos de chuva intensa (Rose; Peters, 2001) . Esses efeitos são particularmente evidentes em áreas urbanas, onde ruas, edificações e outras infra estruturas impermeabilizadas transformam a hidrologia natural, alterando o equilíbrio entre infiltração e escoamento superficial.

Figura 2 - Mapa de uso e cobertura do solo para bacia Sítio dos Pintos



Fonte: Os Autores, 2025.

A estimativa da área impermeável baseou-se na interpretação visual de imagens de satélite, conforme o mapeamento apresentado na Figura 2, reconhecendo-se que a presença de áreas com densa cobertura vegetal em alguns trechos da bacia pode ter dificultado a identificação íntegra de todas as feições hídricas. Essa limitação é comum em análises baseadas em imagens ópticas, especialmente em ambientes urbanos complexos, e pode resultar em alguma sub-representação de elementos lineares, como drenagens menores e cursos d'água pouco expressivos (Rose; Peters, 2001; EPA, 2023)

Quanto às características de geração de escoamento, o Curve Number (CN) médio da bacia em condição antecedente seca (ARCI) foi de 65,095, para a condição antecedente média (ARC II) de 81,095 e 91,714 para a condição antecedente úmida (ARC III), valores que refletem o aumento da propensão ao escoamento superficial sob condições de maior umidade do solo.

A chuva de projeto, determinada a partir da curva Intensidade–Duração–Frequência (IDF) para Recife, revelou intensidades variando de 66,34 mm/h, para o tempo de retorno de 5 anos, a 109,44 mm/h, para o tempo de retorno de 100 anos, resultando em precipitações totais de 47,77 mm, 62,51 mm, 70,19 mm e 78,81 mm, respectivamente. Esses valores evidenciam o aumento progressivo da severidade dos eventos extremos à medida que se elevam os tempos de retorno (Tabela 4).

Tabela 4 - Intensidades médias (i) e precipitações totais (P. total) estimadas a partir da curva IDF para diferentes tempos de retorno

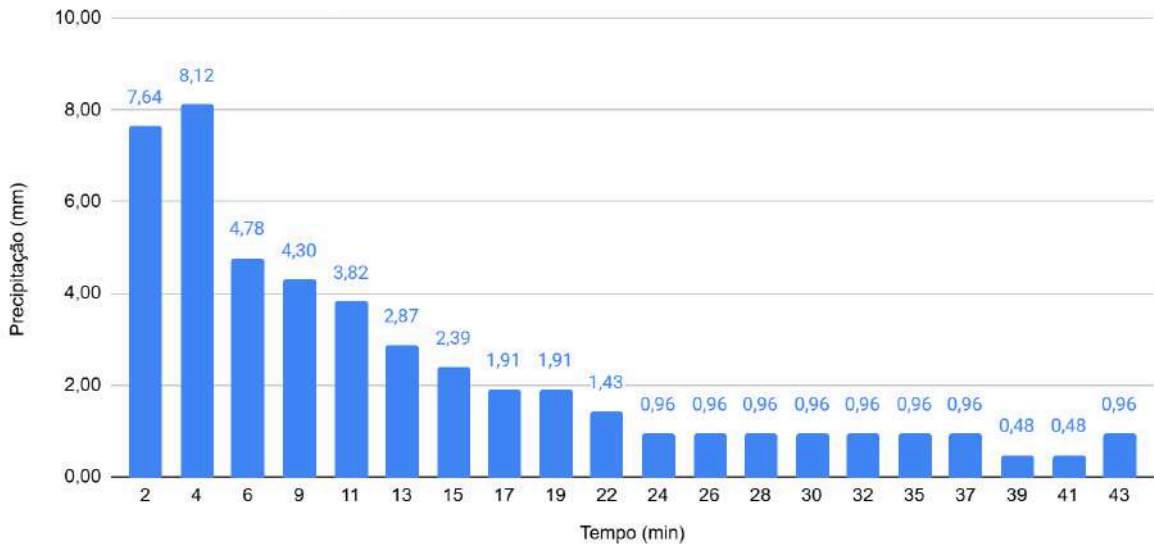
Tempo de retorno	i (mm/h)	P. total (mm)
5 anos	66,34	47,77
25 anos	86,81	62,51
50 anos	97,47	70,19
100 anos	109,44	78,81

Fonte: Os Autores, 2025.

À medida que o tempo de retorno aumenta, observa-se não apenas o incremento do volume total precipitado, mas também o aumento das lâminas absolutas de precipitação

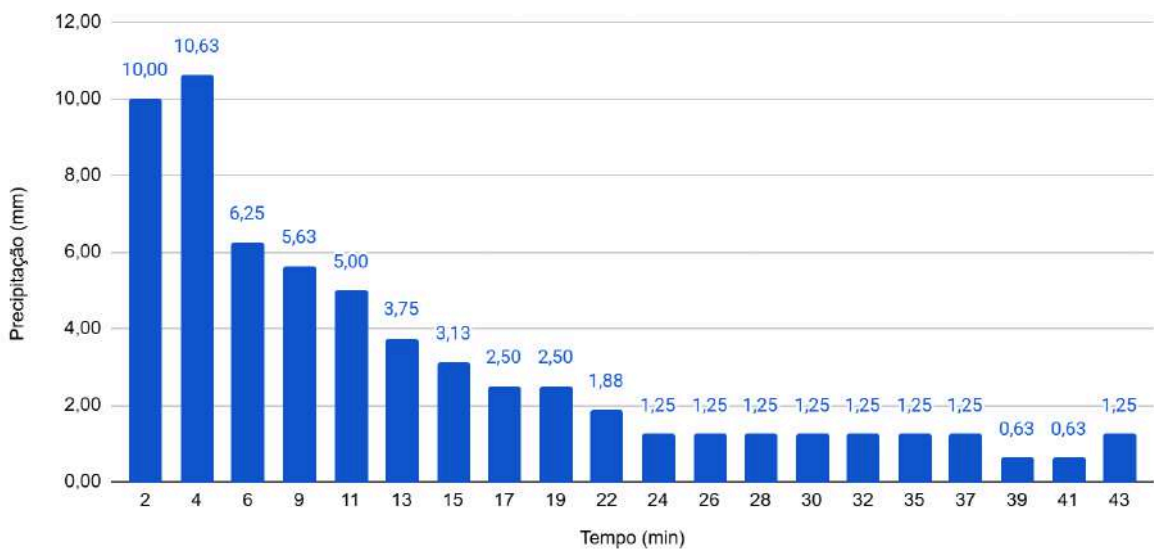
concentradas nos instantes iniciais do evento, quando adotada a distribuição temporal pelo método de Huff (Gráfico 1, Gráfico 2, Gráfico 3 e Gráfico 4).

Gráfico 1 - Distribuição temporal da precipitação pelo método de Huff (1º quartil) para o $Tr = 5$ anos



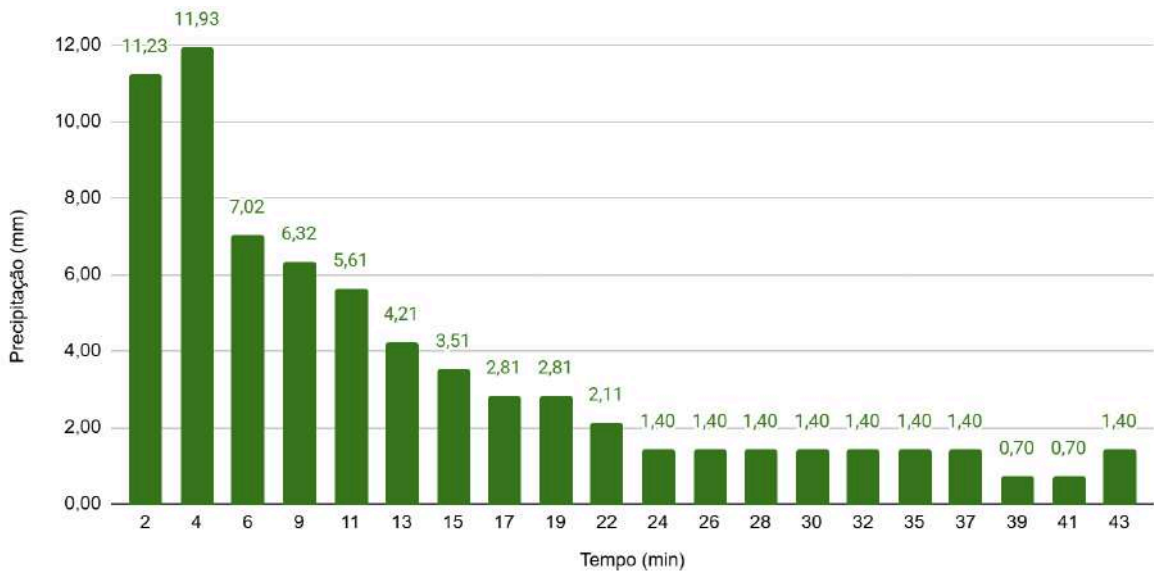
Fonte: Os Autores, 2025.

Gráfico 2 - Distribuição temporal da precipitação pelo método de Huff (1º quartil) para o $Tr = 25$ anos



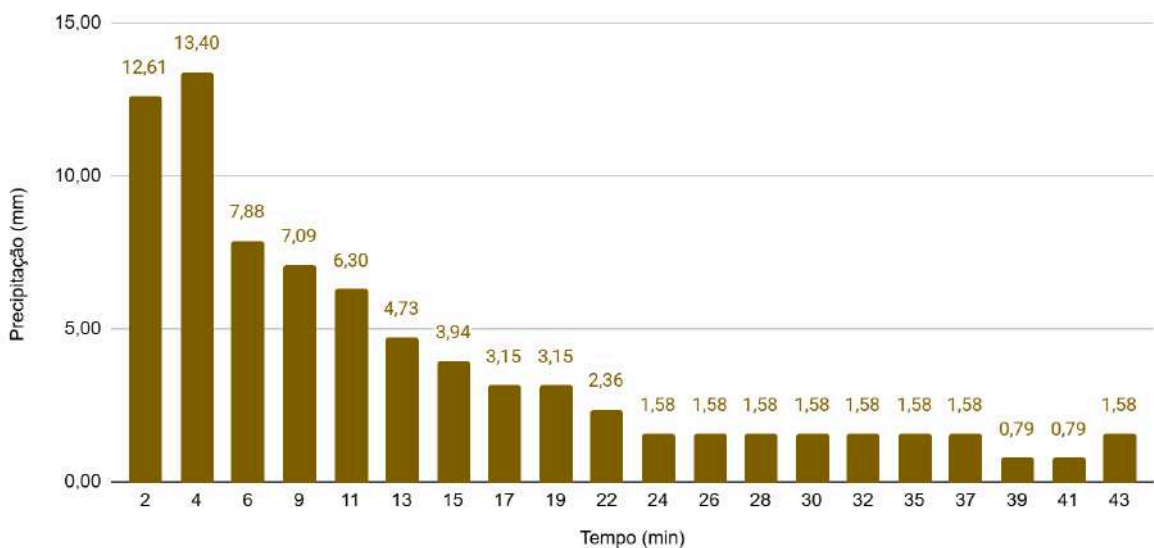
Fonte: Os Autores, 2025.

Gráfico 3 - Distribuição temporal da precipitação pelo método de Huff (1º quartil) para o Tr = 50 anos



Fonte: Os Autores, 2025.

Gráfico 4 - Distribuição temporal da precipitação pelo método de Huff (1º quartil) para o Tr = 100 anos



Fonte: Os Autores, 2025.

O tempo de concentração da bacia foi estimado em 43,20 minutos, pelo método empírico de Carter, apropriado para bacias com forma mais alongada (Fernandes; Pizzo,

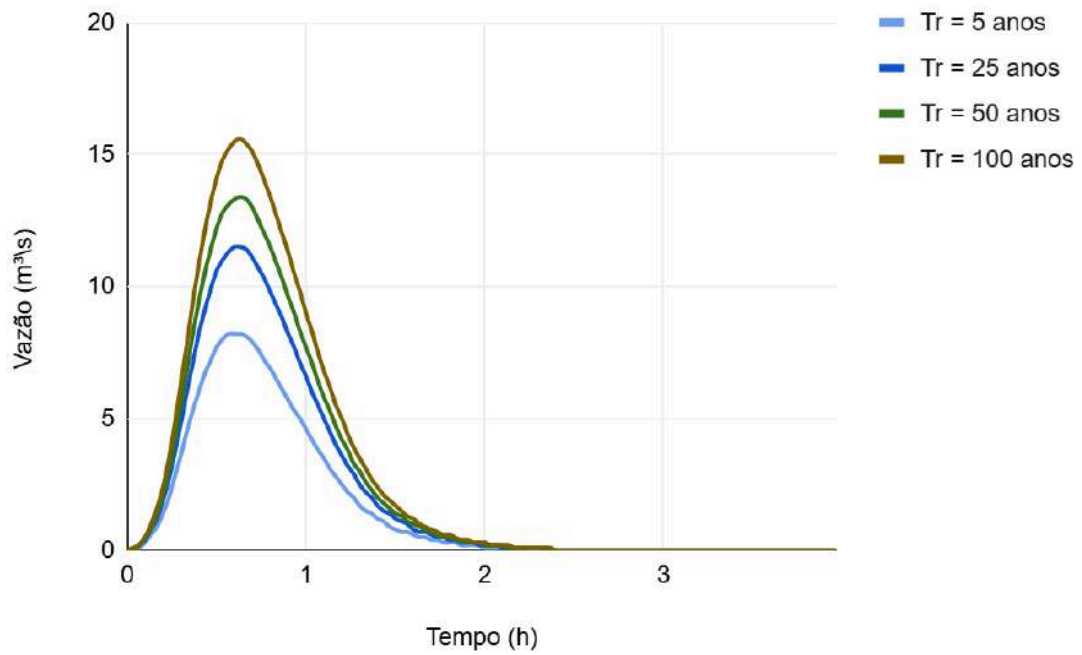
2025). O Lag Time correspondente foi de 25,92 minutos, indicando uma resposta hidrológica relativamente rápida, característica frequentemente observada em bacias urbanizadas e de pequena área.

De acordo com ponto de vista hidrológico, a bacia do Sítio dos Pintos apresenta resposta rápida aos eventos de precipitação, típica de bacias urbanas, em função do aumento das superfícies impermeáveis e das modificações na drenagem natural. Estudos indicam a ocorrência de processos como assoreamento do leito, instabilidade das margens e intervenções estruturais, incluindo canalizações e trechos suprimidos em galerias de drenagem, fatores que alteram significativamente a dinâmica do escoamento e contribuem para o aumento das vazões de pico durante chuvas intensas (Cabral et al., 2014; Cabral et al., 2018).

Em contextos urbanos, a elevada proporção de superfícies impermeáveis e a presença de redes de drenagem artificiais reduzem o tempo necessário para que toda a chuva contribua para o escoamento superficial, acelerando a chegada do pico de vazão ao exutório da bacia. Estudos em bacias urbanizadas demonstram que essas respostas rápidas são típicas de ambientes fortemente urbanizados, nos quais o aumento do escoamento superficial e a diminuição da infiltração alteram significativamente a hidrodinâmica local, favorecendo eventos de cheias de curta duração e de rápida elevação de níveis (Ten Veldhuis; Schleiss, 2017). Esses fatores reforçam a necessidade de considerar a morfologia e o grau de urbanização da bacia na interpretação dos tempos de resposta hidrológica e na parametrização de modelos de chuva-escoamento.

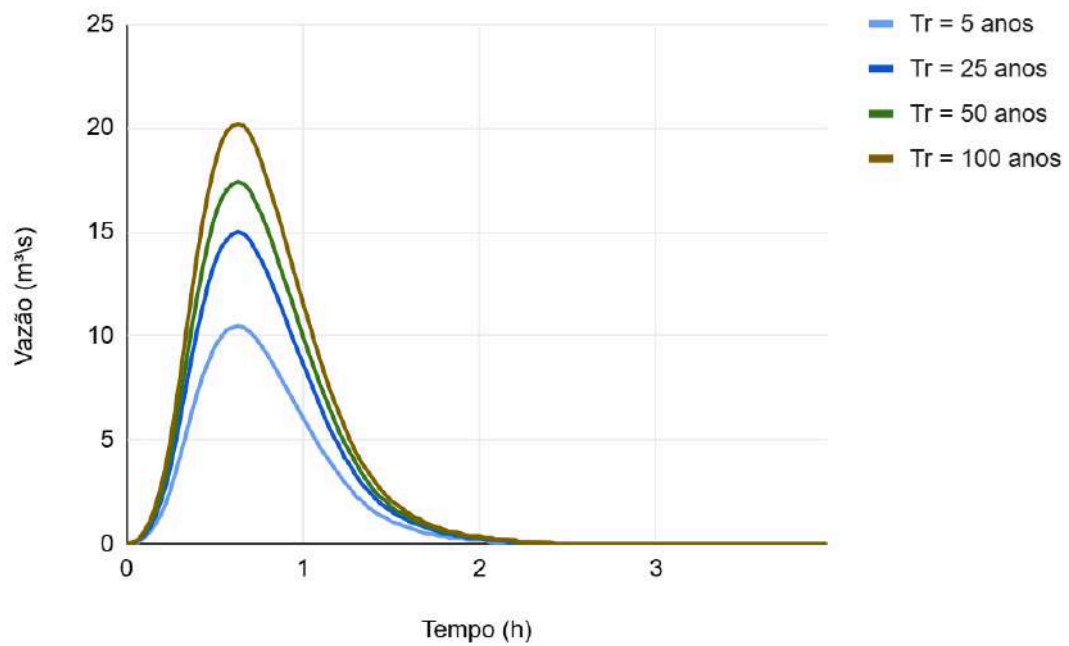
Os Gráficos 5, 6 e 7 apresentam os hidrogramas simulados no HEC-HMS para a bacia do Sítio dos Pintos, considerando diferentes tempos de retorno e três condições antecedentes de escoamento: seca (ARC I), média (ARC II) e úmida (ARC III).

Gráfico 5 - Hidrogramas simulados no HEC-HMS para a condição antecedente seca (ARC I)



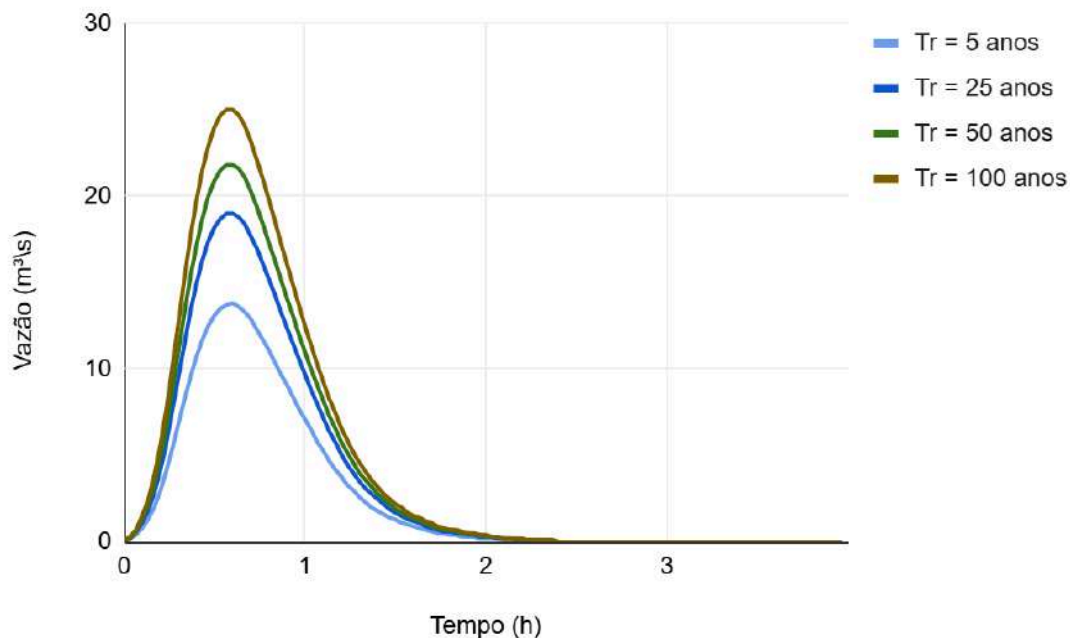
Fonte: Os Autores, 2025.

Gráfico 6 - Hidrogramas simulados no HEC-HMS para a condição antecedente seca (ARC II)



Fonte: Os Autores, 2025.

Gráfico 7 - Hidrogramas simulados no HEC-HMS para a condição antecedente seca (ARC III)



Fonte: Os Autores, 2025.

A Tabela 5 apresenta o resumo dos resultados das simulações hidrológicas. Observa-se, de forma mais explícita, que para um mesmo período de retorno, a condição antecedente exerce influência direta sobre os valores de vazão de pico simulados.

Tabela 5 - Resumo das simulações hidrológicas efetuadas no HEC-HMS

Cenário	Tempo de retorno	Condição antecedente	P Total (mm)	Vazão de pico (m³/s)
1	5 anos	Seco	47,770	8,2
2		Médio		10,5
3		Úmido		13,8
4	25 anos	Seco	62,510	11,5
5		Médio		15
6		Úmido		19

7	50 anos	Seco	70,186	13,4
8		Médio		17,4
9		Úmido		21,8
10	100 anos	Seco	78,805	15,6
11		Médio		20,2
12		Úmido		25

Fonte: Os Autores, 2025.

Esse comportamento é coerente com os fundamentos do método Soil Conservation Service – Curve Number (SCS-CN), no qual o valor do Curve Number representa a capacidade de infiltração da bacia em função do uso e ocupação do solo, do tipo de solo e, de forma determinante, da condição de umidade antecedente. Em condições secas (ARC I), a maior capacidade de infiltração do solo resulta em menores volumes de escoamento superficial, enquanto a progressão para condições média e úmida implica aumento do CN e redução da infiltração. Neste estudo, os valores de CN evoluíram de condição seca para média e úmida, atingindo 81,095 (ARC II) e 91,714 (ARC III), o que se reflete diretamente no aumento das vazões de pico simuladas (USDA-SCS, 1972; Tucci, 2008).

A análise dos resultados evidencia que, para todos os tempos de retorno avaliados, as menores vazões de pico ocorrem sob condição antecedente seca, aumentando de forma sistemática à medida que a bacia evolui para condições de maior umidade. Para o evento com tempo de retorno de 5 anos, a vazão de pico simulada passa de 8,2 m³/s (ARC I) para 10,5 m³/s (ARC II) e 13,8 m³/s (ARC III). Tendência semelhante é observada para os eventos mais extremos, como o de 100 anos, no qual as vazões de pico aumentam de 15,6 m³/s, na condição seca, para 20,2 m³/s, na condição média, atingindo 25,0 m³/s sob condição úmida. Esses resultados indicam que solos previamente secos atuam como um fator atenuador da resposta hidrológica, enquanto solos saturados favorecem respostas mais rápidas e concentradas, com elevação significativa dos picos de vazão (Gráfico 5 e Gráfico 7).

A comparação entre cenários evidencia, ainda, que a condição antecedente de umidade do solo pode exercer influência tão ou mais significativa sobre a resposta hidrológica quanto o próprio tempo de retorno do evento. Observa-se que, em condição antecedente úmida (ARC

III), eventos associados a tempos de retorno menores podem resultar em vazões de pico superiores àquelas simuladas para tempos de retorno mais elevados sob condições seca (ARC I) ou média (ARC II). Esse comportamento é claramente observado, por exemplo, quando a vazão de pico simulada para o evento de 25 anos em condição úmida ultrapassa os valores obtidos para os eventos de 50 e 100 anos em condição seca.

Tal resultado reforça que a umidade antecedente atua como um fator amplificador da resposta hidrológica, reduzindo a capacidade de infiltração do solo e antecipando a conversão da precipitação em escoamento superficial. Em bacias urbanizadas, esse efeito torna-se ainda mais pronunciado, uma vez que a presença de superfícies impermeáveis limita os mecanismos de armazenamento e infiltração, fazendo com que chuvas de menor raridade, quando precedidas por períodos úmidos, possam gerar respostas hidrológicas equivalentes ou superiores às de eventos extremos em condições mais secas. Tal comportamento é discutido na literatura, especialmente em bacias urbanas e periurbanas, nas quais uma maior impermeabilização do solo, associada a condições de umidade antecedente elevada, potencializa a geração de cheias rápidas e aumenta o risco de inundações (Chow; Maidment; Mays, 1988; Tucci, 2008).

Estudos hidrológicos internacionais têm ressaltado a importância da condição antecedente de umidade do solo como determinante na geração de vazões de pico e na frequência de eventos extremos, corroborando os resultados observados neste trabalho para a Bacia do Sítio dos Pintos. Por exemplo, na Napa River Basin (Califórnia, EUA), Kim et al. (2019) demonstraram que a mesma precipitação associada a um tempo de retorno pode resultar em diferentes magnitudes de enchentes dependendo do estado de umidade antecedente do solo. De forma similar, na bacia do Maha Oya (Sri Lanka), pesquisa com o modelo HEC-HMS mostrou que a inclusão de uma condição antecedente úmida (AMC-III) melhorou a performance do modelo e elevou os valores de escoamento simulados em comparação à condição média, reforçando que cenários de maior saturação do solo intensificam o escoamento superficial (Kamran & Rajapakse, 2018).

Os resultados reforçam, portanto, a importância da consideração de diferentes condições antecedentes de escoamento em estudos voltados ao planejamento urbano e à gestão de riscos hidrológicos, uma vez que a adoção exclusiva da condição média ou seca pode conduzir à subestimação de vazões críticas, sobretudo em contextos de períodos chuvosos.

5.3. Modelagem hidrodinâmica

Na etapa de simulação hidrodinâmica, os valores de Manning (n) foram atribuídos de forma espacialmente distribuída, de acordo com as classes de uso e cobertura do solo identificadas na bacia, seguindo a classificação adotada por Cea et al. (2024) (Tabela 6). A diferenciação espacial dos valores de rugosidade permite representar de forma mais realista a heterogeneidade do escoamento ao longo da bacia.

Tabela 6 - Coeficiente de Manning atribuído a cada classe de uso e cobertura do solo presente na Bacia Sítio dos Pintos

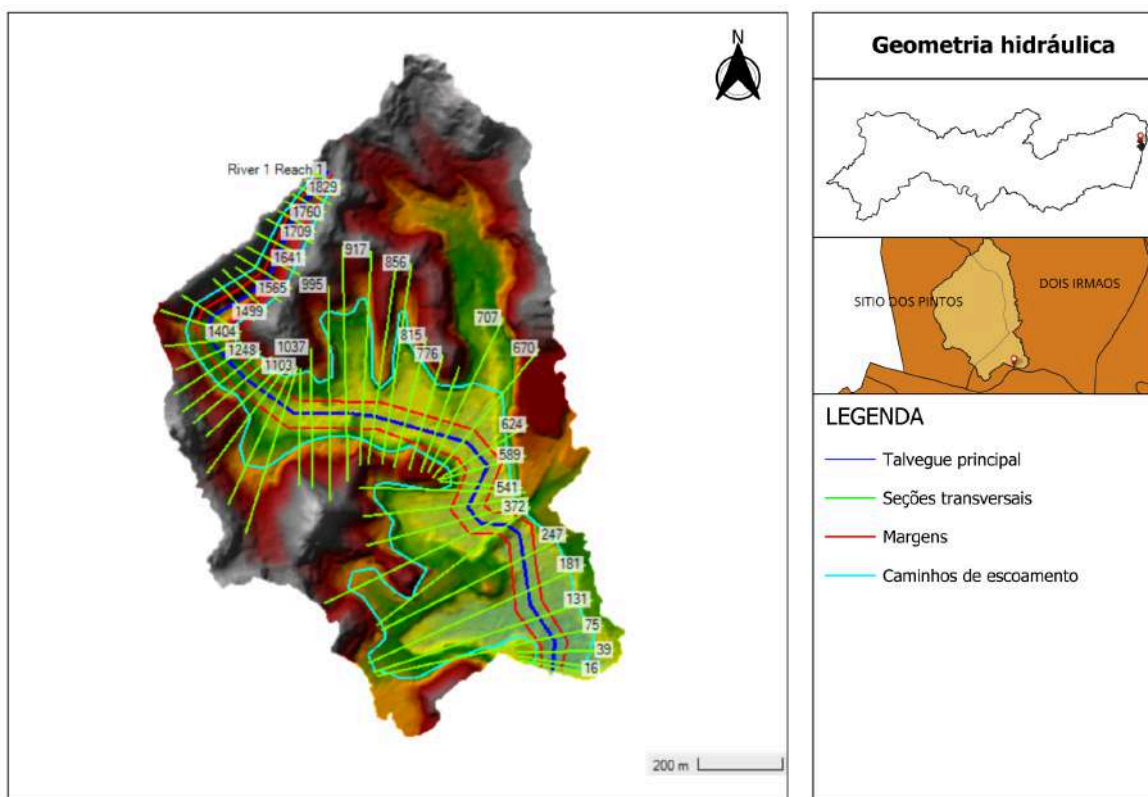
Uso e cobertura do solo	Manning (n)
Área vegetada	0,07
Corpos d'água	0,025
Área urbanizada	0,1

Fonte: Os Autores, 2025.

A geometria hidráulica (figura 3) utilizada na simulação hidrodinâmica foi definida a partir do traçado do talvegue principal, previamente determinado na etapa de delimitação da bacia. As margens do canal foram estimadas com base na interpretação de trechos visíveis do curso d'água em imagens do Google Satellite, associada à análise das cotas altimétricas do terreno, de modo a representar de forma aproximada a seção molhada do canal.

Os caminhos preferenciais de escoamento foram traçados respeitando as elevações do terreno, de forma a reproduzir a direção natural do fluxo superficial em eventos de cheia. As seções transversais foram definidas manualmente ao longo do talvegue principal, com espaçamento aproximado de 35 m, priorizando-se a perpendicularidade em relação ao eixo do canal (Figura 3).

Figura 3 - Geometria hidráulica utilizada na modelagem do software HEC-RAS

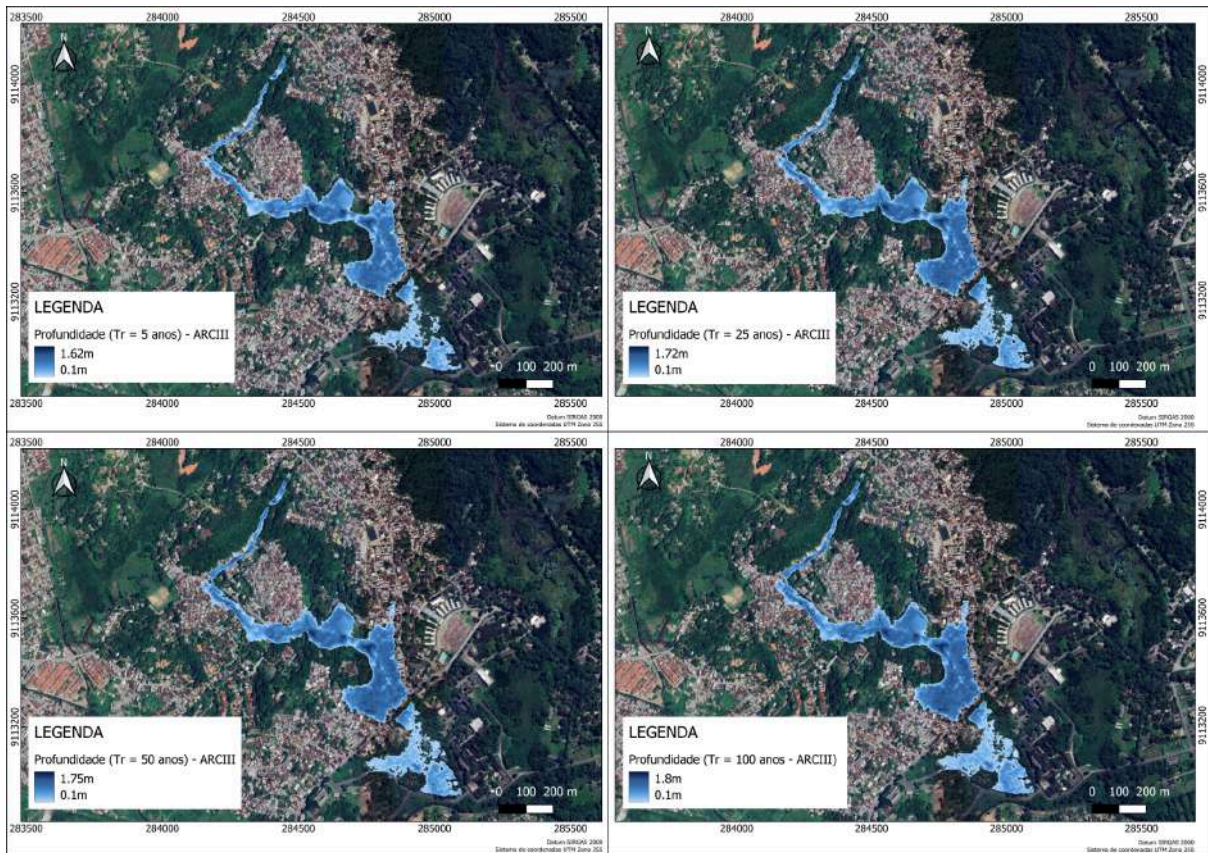


Fonte: Os Autores, 2025.

Foram simulados doze cenários hidrodinâmicos, resultantes da combinação entre quatro tempos de retorno e três condições antecedentes de escoamento. No corpo do trabalho, são apresentados os cenários considerados mais representativos do ponto de vista da análise hidrológica, enquanto os demais resultados encontram-se disponibilizados no Anexo 1 e 2.

A Figura 4 apresenta as manchas de inundação simuladas no HEC-RAS para diferentes tempos de retorno (5, 25, 50 e 100 anos), considerando a condição antecedente de escoamento úmida (ARC III), identificada como o cenário mais crítico do ponto de vista hidrológico. A opção por analisar comparativamente os tempos de retorno sob uma mesma condição antecedente permite isolar o efeito do aumento da vazão afluente sobre a dinâmica das inundações, facilitando a interpretação dos padrões espaciais.

Figura 4 - Manchas de inundação para diferentes tempos de retorno em condição antecedente de escoamento úmida (ARCIII)



Fonte: Os Autores, 2025.

Observa-se, na Figura 4, que as áreas inundadas se concentram ao longo do talvegue principal e de suas margens imediatas, apresentando expansão progressiva da mancha à medida que o tempo de retorno aumenta. Tal padrão indica que, sob condição de solo previamente saturado, mesmo eventos com tempos de retorno relativamente baixos são capazes de promover o extravasamento do canal. Esse resultado está em consonância com os princípios da hidráulica de canais, segundo os quais o aumento da descarga acarreta elevação do nível d'água e maior transbordamento para as planícies adjacentes, especialmente em trechos de menor declividade e menor capacidade de escoamento (Chow, 1959).

Em contexto urbano brasileiro, resultados semelhantes foram observados na modelagem da bacia do Rio Morno, em Recife (PE), onde a integração dos modelos HEC-HMS e HEC-RAS indicou que cenários com maior intensidade pluviométrica produziram expansão significativa das áreas inundadas e incremento nas profundidades

médias simuladas (Pereira, 2025).

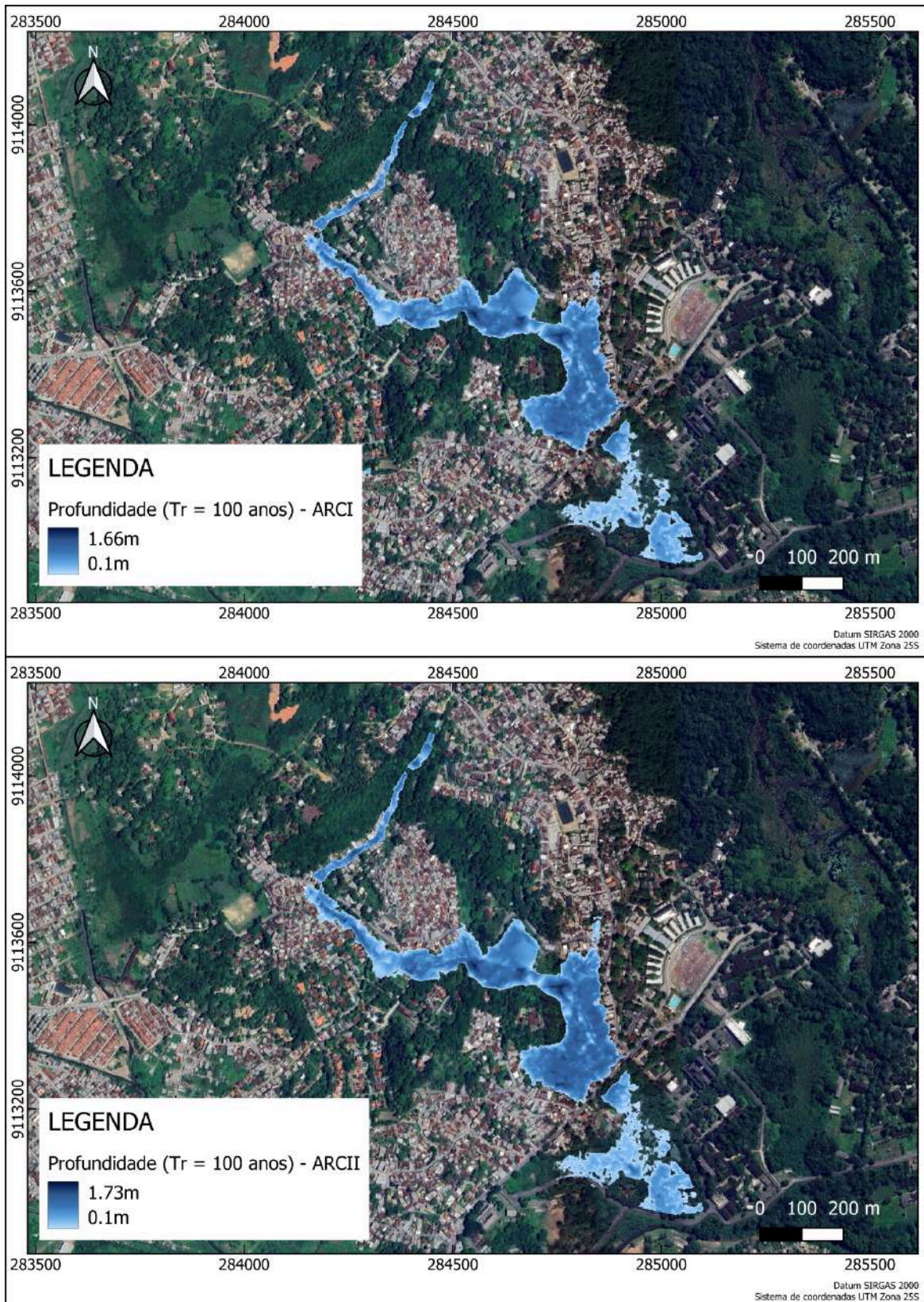
Além da expansão espacial das manchas de inundação, há um incremento progressivo no que diz respeito a profundidade do espelho d'água para os diferentes tempos de retorno, havendo uma variação de 1,52 m, no evento de 5 anos, para cerca de 1,80 m, no cenário extremo de 100 anos, enquanto os valores mínimos, próximos de 0,10 m, estão associados às bordas das manchas de inundação. As maiores profundidades concentram-se ao longo do canal principal e em trechos de menor cota, onde o escoamento tende a se acumular e a velocidade do fluxo é reduzida.

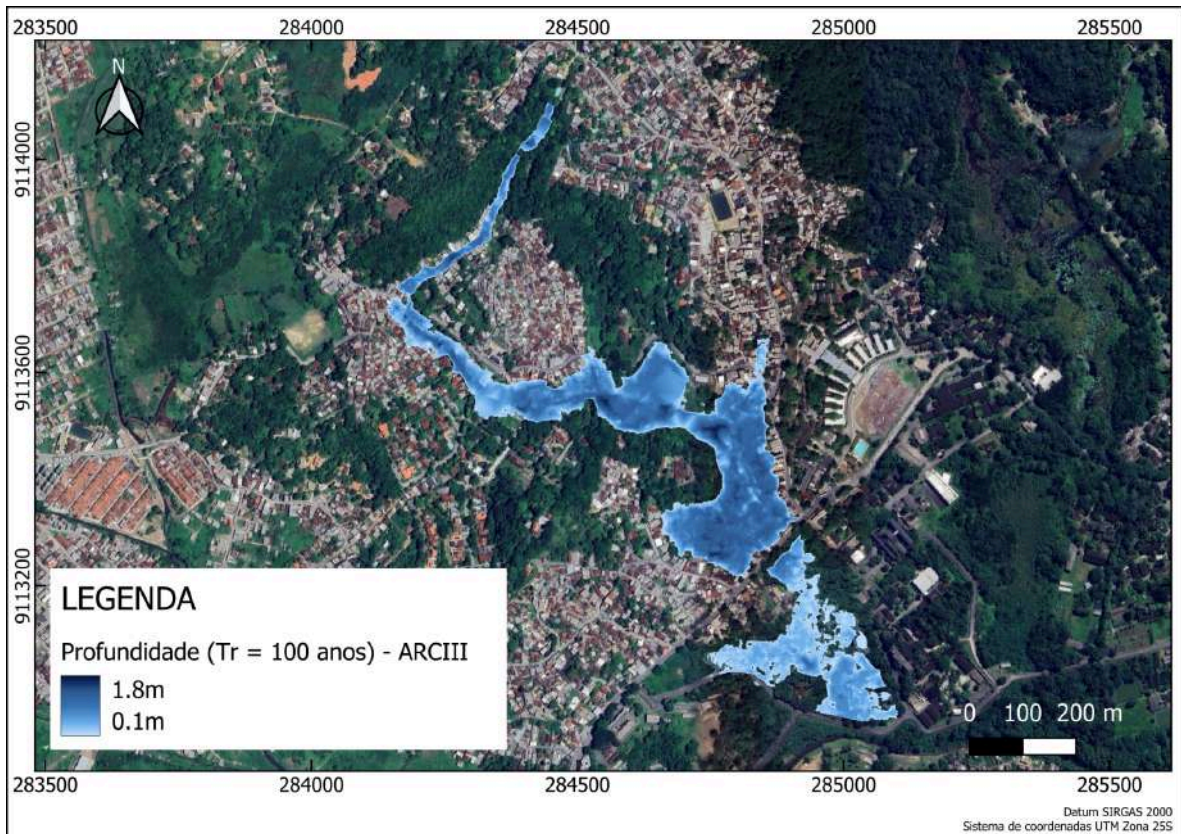
Em uma análise paralela, mantendo-se constante o tempo de retorno de 100 anos, a comparação entre as diferentes condições antecedentes de escoamento (ARC I, ARC II e ARC III) (Figura 5) evidencia de forma clara a influência da umidade inicial do solo sobre a dinâmica das inundações simuladas. Observa-se que a progressão de uma condição seca para uma condição úmida resulta não apenas na ampliação das manchas de inundação, mas também no aumento das profundidades associadas.

Sob condição antecedente seca (ARC I), as manchas de inundação apresentam menor extensão e profundidades reduzidas, concentradas nas áreas mais rebaixadas (Figura 5), em razão da maior capacidade de infiltração do solo, especialmente nas áreas vegetadas, que atenuam o escoamento superficial. Na condição média (ARC II), observa-se intensificação do processo de inundação, com aumento da área alagada e das profundidades simuladas, decorrente da redução parcial da infiltração e maior conversão da precipitação em escoamento superficial (Figura 5). Trata-se de um cenário intermediário, com resposta hidrológica mais rápida, porém ainda parcialmente amortecida. Sob condição úmida (ARC III), os impactos do evento com Tr de 100 anos tornam-se significativamente superiores aos de Tr de 5 anos (Figura 5), com máxima expansão da mancha de inundação e maiores profundidades simuladas. A elevada umidade reduz drasticamente a infiltração, intensificando o volume escoado e a resposta hidrológica da bacia.

Esse comportamento está de acordo com o método SCS-CN, no qual a condição antecedente de umidade controla a capacidade de infiltração e o volume de escoamento gerado. Solos sob condição seca (ARC I) apresentam maior abstração inicial e menor geração de escoamento, enquanto a condição úmida (ARC III) reduz a infiltração e intensifica os picos de vazão e as áreas inundadas (USDA-SCS, 1986; TUCCI, 2013).

Figura 5 - Manchas de inundação em diferentes condições de escoamento antecedente para o $Tr = 100$ anos





Fonte: Os Autores, 2025.

Essa análise comparativa demonstra que, mesmo para um mesmo tempo de retorno, a condição antecedente de escoamento exerce papel importante na resposta hidrológica, podendo amplificar ou atenuar de forma significativa os impactos associados a eventos extremos. Do ponto de vista da gestão de riscos, os resultados reforçam que a adoção de um único cenário hidrológico — usualmente associado à condição média — pode subestimar situações críticas, especialmente em períodos chuvosos sucessivos, nos quais o solo já se encontra próximo da saturação.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A delimitação e caracterização morfométrica da bacia permitiram compreender seus condicionantes físicos naturais, evidenciando uma configuração predominantemente alongada, com baixa propensão geométrica à ocorrência de cheias rápidas sob condições naturais. Contudo, a análise do uso e ocupação do solo revelou elevado grau de impermeabilização (43,34%), fator que altera significativamente a resposta hidrológica natural e potencializa a geração de escoamento superficial.

A aplicação da modelagem hidrológica por meio do HEC-HMS possibilitou a simulação da transformação chuva–vazão para diferentes tempos de retorno (5, 25, 50 e 100 anos), utilizando chuvas de projeto derivadas da curva IDF local e distribuídas pelo método de Huff. Os resultados evidenciaram aumento progressivo das vazões de pico com a elevação do tempo de retorno, confirmando a coerência hidrológica do modelo adotado.

A análise da influência das condições de escoamento antecedente demonstrou que a umidade antecedente do solo exerce papel determinante na resposta da bacia. Observou-se incremento sistemático das vazões de pico à medida que se passou da condição seca (ARCI) para média (ARCII) e úmida (ARCIII), alcançando valores máximos de 25 m³/s para o cenário de 100 anos sob condição úmida. Destaca-se que eventos com menor tempo de retorno, quando associados à condição antecedente úmida, apresentaram vazões superiores às aquelas obtidas para eventos mais raros sob condição seca, evidenciando que a umidade antecedente pode atuar como fator amplificador da resposta hidrológica, por vezes com impacto comparável ou superior ao próprio tempo de retorno.

As simulações hidrodinâmicas indicaram que tanto o aumento do tempo de retorno quanto, sobretudo, a elevação da umidade antecedente contribuem para a ampliação das áreas inundadas e para o incremento das profundidades de alagamento. A comparação entre cenários com mesmo tempo de retorno e diferentes condições antecedentes reforçou que a condição úmida representa a situação mais crítica do ponto de vista hidrodinâmico, intensificando os impactos potenciais sobre as áreas urbanizadas adjacentes ao talvegue principal.

De forma integrada, os resultados obtidos demonstram a importância da consideração simultânea entre características físicas da bacia, taxa de urbanização, regime pluviométrico,

condições antecedentes de escoamento e processos hidrodinâmicos na avaliação do risco de inundações urbanas. A abordagem adotada mostrou-se adequada para subsidiar estudos de planejamento urbano, gestão da drenagem e análise de risco, especialmente em bacias de pequeno porte inseridas em áreas densamente urbanizadas.

Por fim, ressalta-se que os resultados apresentados estão condicionados às hipóteses adotadas, às bases de dados disponíveis. Ainda assim, o estudo contribui para a compreensão da dinâmica hidrológica e hidrodinâmica da Bacia do Riacho Sítio dos Pintos, destacando a necessidade de incorporação de múltiplos cenários hidrológicos em análises voltadas à mitigação de inundações urbanas. Como perspectivas futuras, expõe-se a calibração dos modelos a partir de dados observados e nível d'água, a aplicação de modelagem hidrodinâmica bidimensional e a projeção de Sistemas de Drenagem Sustentável (SUDS) para a bacia Sítio dos Pintos.

7. REFERÊNCIAS

- ABREU, F. G.; SOBRINHA, L. A.; BRANDAO, J. L. B. (2017). Análise da distribuição temporal das chuvas em eventos hidrológicos extremos. *Eng. Sanit. Ambient* 22(2), pp. 239-250, 2017.
- ALLAN, R. P.; SODEN, B. J. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science*, v. 321, n. 5895, p. 1481–1484, 2008.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ARAÚJO, L. R.; SOUZA, F. A.; PEREIRA, M. G. Aplicação de modelos hidrológicos na análise de cheias urbanas sob diferentes cenários de uso do solo. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 29, e22, 2024.
- BRUNNER, G. W. HEC-RAS River Analysis System: User's Manual (Version 5.0). Davis: U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2016.
- CABRAL, J. J. da S. P.; et. al. Características hidrológicas do riacho Sítio dos Pintos como subsídio para o processo de revitalização. 2018. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE.
- CABRAL, J. J. da S. P.; et. al. Resiliência de engenharia como subsídio ao processo de revitalização de três riachos urbanos em Recife-PE. 2020. In: SIMPÓSIO DE REVITALIZAÇÃO DE RIOS URBANOS.
- CABRAL, J. J. S. P.; Preuss, S. L. C.; Neto, G. C. F. Capibaribe e seus afluentes na planície de Recife: visão multidisciplinar de um rio urbano e sua importância para o sistema de drenagem das águas pluviais. 2014. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE.
- CANHOLI, A. P. Drenagem urbana e controle de enchentes. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.
- CEA, L.; ÁLVAREZ, M.; PUERTAS, J. Utilizando modelagem hidrológica-hidráulica integrada e fontes de dados globais para analisar as inundações de fevereiro de 2023 na bacia

hidrográfica de Umbeluzi (Moçambique). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 24, 225–243, <https://doi.org/10.5194/nhess-24-225-2024>, 2024.

CHAVES, J. V. B. Modelagem hidrológica e hidrodinâmica com geração de mapas de perigo de inundação na Bacia do Tapacurá. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

CHEN, J.; WANG, H.; HUANG, X. Urbanization impacts on surface runoff of the contiguous United States. *Journal of Environmental Management*, v. 201, p. 32–41, 2016.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. *Applied hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1988.

CHRISTOFOLETTI, A. *Geomorfologia*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.

COSTA, J. M. F. da; SILVEIRA, C. da S.; COSTA, A. C.; MARCOS JUNIOR, A. D.; GONÇALVES, S. T. N. (2025). Trend analysis of precipitation extremes in Brazil: the role of atmospheric temperature. *Revista Brasileira De Ciências Ambientais*, 60, e2123. <https://doi.org/10.5327/Z2176-94782123>

DOUGLAS, I. et al. Unjust waters: climate change, flooding and the urban poor in Africa. *Environment and Urbanization*, v. 20, n. 1, p. 187–205, 2008.

FERNANDEZ, Oscar V. Q; PIZZO, Henrique da Silva. Comparação entre o tempo de concentração estimado pelo método cinemático NRCS e as equações empíricas em duas microbacias urbanas de Marechal Cândido Rondon (PR). *Boletim Paulista de Geografia*, v. 1, n. 113, p. 273–289, 2025. <https://doi.org/10.61636/bpg.v1i113.3432>

GUASSELLI, L. A.; OLIVEIRA, G. G.; QUEVEDO, R. P.; BRUBACHER, J. P. Modelagem hidrológica e espacialização de áreas suscetíveis às inundações no município de Igrejinha (RS). *Geo UERJ*, n. 28, p. 353–380, 2016.

HUFF, F.A. (1967) Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resources Research*, v. 3, n. 4, p. 1007-1019.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

JAAFAR, Hadi H.; AHMAD, Farah A.; EL BEYROUTHY, Naji. GCN250, new global gridded curve numbers for hydrologic modeling and design. *Scientific data*, v. 6, n. 1, p. 145, 2019.

KAMRAN, M.; RAJAPAKSE, R. L. H. L. Effect of watershed subdivision and antecedent moisture condition on HEC-HMS model performance in the Maha Oya Basin, Sri Lanka. *International Journal of Engineering Technology and Sciences*, v. 5, n. 2, p. 22–37, 2018. DOI: 10.15282/ijets.v5i2.1391.

KIM, J.; JOHNSON, L.; CIFELLI, R.; et al. Assessment of antecedent moisture condition on flood frequency: an experimental study in Napa River Basin, CA. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 26, p. 100629, 2019. DOI: 10.1016/j.ejrh.2019.100629.

KUNDZEWICZ, Z. W. et al. Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, v. 59, n. 1, p. 1–28, 2014.

LI, J.; ZHOU, W.; TAO, C. The Impact of Urbanization on Surface Runoff and Flood Prevention Strategies: A Case Study of a Traditional Village. *Land*, 2024, 13, 1528. <https://doi.org/10.3390/land13091528>

MALLA, Sushmita; OHGUSHI, Koichiro. Evaluation of Climate Change Impact on Future Flood in the Bagmati River Basin, Nepal Using CMIP6 Climate Projections and HEC-RAS Modeling. 2025. DOI: 10.2139/ssrn.5153177

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 129, p. 1189–1200, 2017.

MEDEIROS, E. L. C. de. Modelagem computacional do riacho Sítio dos Pintos no Recife/PE incluindo os efeitos de técnicas compensatórias. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

MILLER, V. C. A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee. Technical Report, Columbia University, 1953.

MISHRA, S. K.; SINGH, V. P. Field Applicability of the SCS-CN-Based Mishra–Singh General Model and its Variants. *Water Resources Management*, 2005.

PAUL, M. J.; MEYER, J. L. Streams in the urban landscape. *Annual Review of Ecology and Systematics*, v. 32, p. 333–365, 2001.

PDDR. Plano Diretor de Drenagem de Recife. Prefeitura do Recife. 2015. Disponível em: . Acesso em: 10 de dezembro de 2025.

PE3D. Pernambuco Tridimensional. Governo do Estado de Pernambuco. 2016. Disponível em: <https://pe3d.pe.gov.br/mapa.php>. Acesso em 02 de dezembro de 2025.

PEREIRA, Acauã Bernardo da Silva. Modelagem hidrológica e hidrodinâmica da bacia hidrográfica do Rio Morno, Recife-PE, para evento de inundação considerando regime de chuvas atuais e mudanças climáticas. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2025.

PONCE, V. M.; HAWKINS, R. H. Runoff curve number: Has it reached maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 1, n. 1, p. 11–19, 1996.

RAN, Q.; LIU, Y.; ZHANG, Q. Antecedent soil moisture effects on runoff generation during extreme rainfall events. *Water Resources Research*, v. 58, n. 4, 2022.

RECIFE (Município). Lei nº 18.014, de 2020. Dispõe sobre a criação da Área de Proteção Ambiental (APA) Sítio dos Pintos. Recife: Prefeitura do Recife, 2020.

RECIFE (PE). Decreto nº 23.818, de 23 de julho de 2008. Regulamenta a Zona Especial de Proteção Ambiental do Sítio dos Pintos. *Diário Oficial do Município do Recife*, 2008. Disponível em: <https://www.legiscidade.recife.pe.gov.br/decreto/23818/>

RECIFE (PE). Serviços para o cidadão — Bairro Sítio dos Pintos. Prefeitura da Cidade do Recife. Disponível em: <https://www2.recife.pe.gov.br/servico/sitio-dos-pintos>. Acesso em: 10 jan. 2026.

RECIFE. Sítio dos Pintos: lado a lado. Recife: Prefeitura da Cidade do Recife, 2012.

ROSE, S.; PETERS, N. E. Effects of urbanization on streamflow in the Atlanta area (Georgia, USA): a comparative hydrological approach. *Hydrological Processes*, v. 15, n. 8, p. 1441–1457, 2001.

SILVA, G. P.; VERARDI, C. A. Sítio dos Pintos (bairro do Recife). *Pesquisa Escolar*. Fundação Joaquim Nabuco, 2017. Disponível em: <https://pesquisaescolar.fundaj.gov.br/pt-br/artigo/sitio-dos-pintos-bairro-recife/>. Acesso em: 10 jan. 2026.

- SILVEIRA, André Luiz Lopes da. 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, 2005.
- STAUDINGER, M.; et. al. The role of antecedent conditions in translating precipitation events into extreme floods at the catchment scale and in a large-basin context. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 25, 247–265, <https://doi.org/10.5194/nhess-25-247-2025>, 2025.
- TEN VELDHUIS, M.-C.; SCHLEISS, M. Statistical analysis of hydrological response in urbanising catchments based on adaptive sampling using inter-amount times. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 21, p. 1991–2013, 2017.
- TUCCI, C. E. M. *Hidrologia urbana*. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2012.
- TUCCI, C. E. M. *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2017.
- TUCCI, C. E. M. *Modelos hidrológicos*. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2008.
- TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. *Inundações urbanas na América do Sul*. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.
- U.S. Army Corps of Engineers. *HEC-RAS River Analysis System: User’s Manual*. Version 6.0. Davis, CA: U.S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, 2021. Disponível em: https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_6.0_Users_Manual.pdf. Acesso em: 24 set. 2025.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. *National Engineering Handbook – Section 4: Hydrology*. Washington, D.C.: Soil Conservation Service, 1972.
- USACE – UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User’s Manual (Version 4.8)*. Davis: Hydrologic Engineering Center, 2021.
- USDA-SCS – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – SOIL CONSERVATION SERVICE. *National engineering handbook: Section 4 – Hydrology*. Washington, DC: USDA, 1985.
- VERÇOSA, Livia Fragoso de Melo. *Modelagem hidrológica e hidrodinâmica aplicada à avaliação da ocorrência de inundações na cidade de Recife, PE*. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

VILLANUEVA, Jairo Isaí Alvarez; VIDAURRE, José Francisco Huamán. Uso del producto global (GCN250) para la identificación del Número de Curva (CN) en la cuenca alta del Jequetepeque, Perú. *Manglar: Revista de Investigación Científica*, v. 22, n. 3, p. 413–421, 2025.

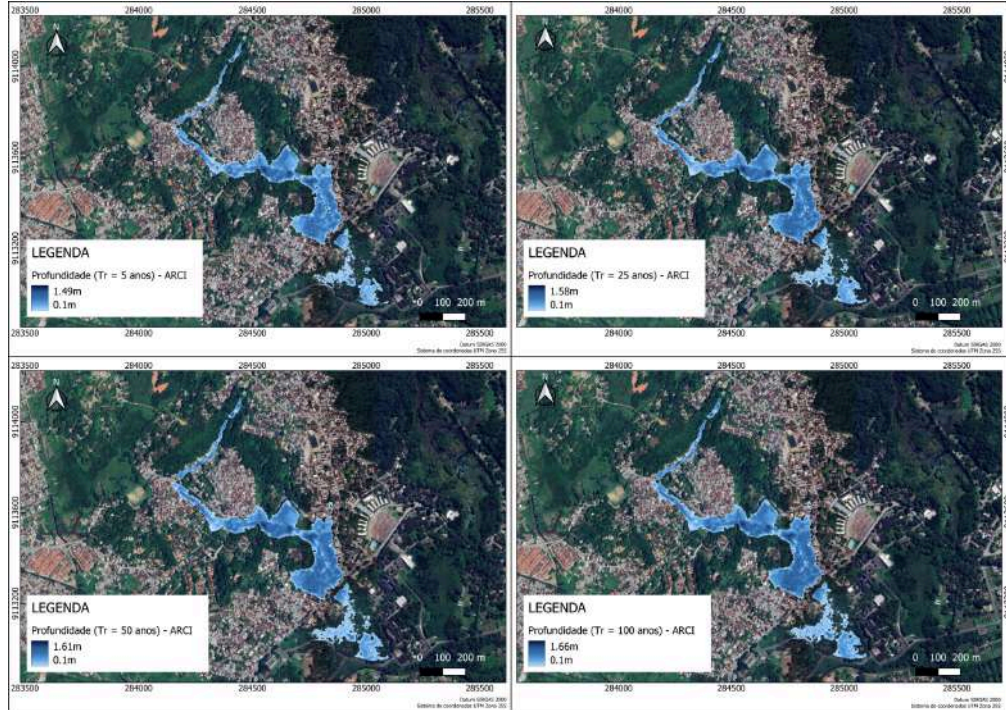
WALSH, C. J. et al. The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. *Journal of the North American Benthological Society*, v. 24, n. 3, p. 706–723, 2005.

WILBY, R. L.; KEENAN, R. Adapting to flood risk under climate change. *Progress in Physical Geography*, v. 36, n. 3, p. 348–378, 2012.

YANG, Xin et al. A typology of global relief classes derived from digital elevation models at 1 arcsec resolution. *Earth System Science Data*, v. 17, n. 9, p. 4331–4350, 2025.

8. ANEXOS

Anexo 1 - Manchas de inundação para diferentes tempos de retorno em condição antecedente de escoamento úmida (ARCI)



Anexo 2 - Manchas de inundação para diferentes tempos de retorno em condição antecedente de escoamento úmida (ARCII)

