



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE – UFAC
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS – CFCH
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MESTRADO EM
GEOGRAFIA - PPMGEO



**APLICAÇÃO DE MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA NO
MAPEAMENTO DE INUNDAÇÕES NA BACIA DO IGARAPÉ SÃO FRANCISCO,
RIO BRANCO – AC**

Linha de pesquisa: Análise da dinâmica socioambiental

ALAN PEDRO MANSANO

Rio Branco - AC

2024

ALAN PEDRO MANSANO

**APLICAÇÃO DE MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA NO
MAPEAMENTO DE INUNDAÇÕES NA BACIA DO IGARAPÉ SÃO FRANCISCO,
RIO BRANCO – AC**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geografia, da Universidade Federal do Acre, como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Geografia**.

Orientador: Dr. Rodrigo Otávio Peréa Serrano

Rio Branco - AC
2024

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da UFAC

M286a Mansano, Alan Pedro, 1996 -

Aplicação de modelagem hidrológica e hidráulica no mapeamento de inundações na bacia do igarapé São Francisco, Rio Branco - AC/ Alan Pedro Mansano; orientador: Dr. Rodrigo Otávio Peréa Serrano. – 2024.

114 f.: il.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Acre, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Mestre em geografia Rio Branco, 2024.
Inclui referências bibliográficas.

1. HEC-HMS. 2. HEC-RAS. 3. Modelagem hidrológica. I. Serrano, Rodrigo Otávio Peréa (orientador). II. Título.

CDD: 910

AGRADECIMENTOS

Sempre que penso em agradecimento, a primeira coisa que me vem à mente é agradecer a Deus por ser filho dos meus pais. Eles desempenharam um papel fundamental para que eu pudesse compartilhar estas palavras aqui.

No início dessa jornada, contei com o apoio dos meus superiores, que sempre reconheceram a importância da pós-graduação e me apoiaram, assim como dos professores, que contribuíram com uma valiosa troca de conhecimento. Sou grato ao Professor Dr. José Genivaldo do Vale Moreira pela ajuda, sobretudo na formulação da metodologia deste trabalho.

Agradeço especialmente ao meu orientador, Dr. Rodrigo Otávio Peréa Serrano, pelo auxílio, pela paciência e por não exercer pressão além do necessário durante o processo.

Não poderia esquecer dos meus parceiros de campo, Barthes e Francisco, obrigado por serem meu suporte. É sempre bom lembrar dos amigos, professores e mentores que, de alguma forma, contribuíram para que este momento se tornasse realidade.

Desistir teria sido mais simples, então, obrigado ao Alan de alguns meses atrás por ter persistido.

Resumo

O aumento quantitativo da população mundial, com destaque para as áreas urbanas, tem impulsionado um rápido processo de urbanização. A associação desse fenômeno às mudanças climáticas tem contribuído para o aumento de enchentes e inundações devido ao acréscimo do escoamento superficial. Nesse sentido, as modelagens hidrológica e hidráulica surgem como ferramentas essenciais para auxiliar gestores no desenvolvimento de estratégias de contenção de riscos, utilizando simulações de eventos meteorológicos. O foco deste estudo foi avaliar o risco de inundaçāo na bacia hidrográfica do Igarapé São Francisco, em Rio Branco - AC, através do emprego da modelagem hidrológica e hidráulica nos tempos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos. Os dados espaciais foram gerados a partir de imagens de satélite *Copernicus DEM*, processadas no software Qgis. A delimitação da bacia hidrográfica, a definição do segmento de fluxo e a conversão de chuva em vazão foram realizadas no software HEC-HMS. O modelo hidráulico foi construído no HEC-RAS, abrangendo a parte urbana do Igarapé São Francisco mais impactada por eventos de grande magnitude, com dados topográficos extraídos do MDE disponibilizado pela PMRB. A análise do modelo hidrológico revelou vazões de pico na Bacia de Contribuição Principal, sendo 467,9 m³/s no tempo de retorno de 5 anos e 1034,3 m³/s no tempo de retorno de 100 anos. Na BHIF, as vazões de pico foram de 22,0 m³/s no tempo de retorno de 5 anos e 38,5 m³/s no tempo de retorno de 100 anos. A simulação hidráulica resultou em áreas inundadas de 2,441, 2,6977, 2,9365, 3,0612 e 3,2102 km² para os tempos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos, respectivamente. Os modelos foram calibrados a partir de dados registrados no evento histórico de março de 2023. Em suma, é possível concluir que as regiões próximas as margens do Igarapé São Francisco são suscetíveis a inundações, a região impactada compreende os Bairros Vila Ivonete, Raimundo Melo, Conquista e Bosque, além dos bairros Baixa da Colina, Casa Nova, Jardim Tropical e Adalberto Aragão que também estão suscetíveis aos efeitos das inundações do Rio Acre. Conclui-se que a utilização desses modelos oferece uma base sólida para um planejamento urbano e uma resposta rápida diante de eventos de inundaçāo em de Rio Branco.

Palavras-chave: HEC-HMS, HEC-RAS, modelagem hidrológica; modelagem hidráulica, inundaçāo, bacia hidrográfica do Igarapé São Francisco.

ABSTRACT

The quantitative increase in the global population, particularly in urban areas, has driven a rapid process of urbanization. The association of this phenomenon with climate change has contributed to an increase in floods and inundations due to the rise in surface runoff. In this context, hydrological and hydraulic modeling emerge as essential tools to assist managers in developing risk containment strategies, using simulations of meteorological events. The focus of this study was to assess the flood risk in the watershed of Igarapé São Francisco, in Rio Branco - AC, through the use of hydrological and hydraulic modeling for return periods of 5, 10, 25, 50, and 100 years. Spatial data were generated from Copernicus DEM satellite images processed in QGIS software. The watershed delineation, flow segment definition, and rainfall-to-runoff conversion were performed in HEC-HMS software. The hydraulic model was built in HEC-RAS, covering the urban part of Igarapé São Francisco most affected by high-magnitude events, with topographic data extracted from the DEM provided by PMRB. The analysis of the hydrological model revealed peak flows in the Main Contributing Basin, being $467.9 \text{ m}^3/\text{s}$ for the 5-year return period and $1034.3 \text{ m}^3/\text{s}$ for the 100-year return period. In the BHIF, peak flows were $22.0 \text{ m}^3/\text{s}$ for the 5-year return period and $38.5 \text{ m}^3/\text{s}$ for the 100-year return period. Hydraulic simulation resulted in flooded areas of 2.441, 2.6977, 2.9365, 3.0612, and 3.2102 km^2 for return periods of 5, 10, 25, 50, and 100 years, respectively. The models were calibrated using data recorded in the historical event of March 2023. In summary, it can be concluded that areas near the banks of Igarapé São Francisco are susceptible to floods. The impacted region includes the neighborhoods of Vila Ivonete, Raimundo Melo, Conquista, and Bosque, as well as the neighborhoods of Baixa da Colina, Casa Nova, Jardim Tropical, and Adalberto Aragão, which are also susceptible to the effects of floods from the Acre River. It is concluded that the use of these models provides a solid foundation for urban planning and a quick response to flood events in Rio Branco.

Keywords: HEC-HMS, HEC-RAS, hydrological modeling; hydraulic modeling, flood, watershed of Igarapé São Francisco.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Ciclo hidrológico.	22
Figura 2 — Representação de uma bacia hidrográfica e uma das suas sub-bacias.	22
Figura 3 — Relevo de uma bacia hidrográfica e as entradas e saídas de água.	23
Figura 4 — Balanço hídrico em uma bacia hidrográfica: (a) antes do processo de urbanização e (b) depois do processo de urbanização.	30
Figura 5 — Tipos de escoamento.	46
Figura 6 — Mapa de localização da Bacia Hidrográfica Igarapé São Francisco (BHISF).	51
Figura 7 — Mapa de Sub-Bacia Urbana na Cidade de Rio Branco (SB-01).	52
Figura 8 — Delimitação da BHISF e divisão em sub-bacias.	57
Figura 9 — Esquema de modelagem utilizado no HEC-HMS	57
Figura 10 — Gráfico da relação IDF para os tempos de retorno de 5, 10 25, 50 e 100 anos.	59
Figura 11 — Esquema para determinação da duração crítica da chuva de projeto.	60
Figura 12 — Ilustração do hidrograma unitário e o <i>Lag Time</i>	63
Figura 13 — Fluxograma de trabalho HEC-RAS....	67
Figura 14 — Polígono, entradas e estruturas adotadas na modelagem hidráulica.	68
Figura 15 — Ponte localizada na Travessa Camboriú.	69
Figura 16 — Bueiros localizados no que cruzam a Avenida Getúlio Vargas.....	70
Figura 17 – Distribuição espacial dos pontos de coleta de dados durante a inundação de março de 2023.....	71
Figura 18 — Grupos hidrológicos e tipos de solos da BHISF.	75
Figura 19 — Uso e ocupação do solo da BHISF.....	76
Figura 20: Grupos hidrológicos e tipos de solos da BHIF.	77
Figura 21 — CN especializado por sub-bacias da BHISF.....	77
Figura 22 — Hidrograma afluente da Bacia de Contribuição Principal nos tempos de retorno: (a) 100 anos; (b) 50 anos; (c) 25 anos; (d) 10 anos; (e) 5 anos.	81
Figura 23 — Hidrograma afluente e efluente da sub-bacia do Igarapé Fundo nos tempos de retorno: (a) 100 anos; (b) 50 anos; (c) 25 anos; (d) 10 anos; (e) 5 anos.	81
Figura 24 — Hidrograma de vazão afluente Bacia de Contribuição Principal para o evento de março de 2023.....	83

Figura 25 — Hidrograma de vazão afluente da Bacia do Igarapé Fundo para o evento de março de 2023.....	83
Figura 26 — Mancha de inundação máxima gerada no HEC-RAS para o tempo de retorno de 5 anos.	85
Figura 27 — Mapa ilustrativo das velocidades máximas de escoamento em cada do ISF gerada no HEC-RAS para o tempo de retorno de 5 anos.....	85
Figura 28 — Bairros de Rio Branco próximos ao trecho do ISF modelado hidráulicamente.	86
Figura 29 — Mancha de inundação máxima gerada no HEC-RAS para o tempo de retorno de 10 anos.	86
Figura 30 — Mapa ilustrativo das velocidades máximas de escoamento em cada do ISF gerada no HEC-RAS para o tempo de retorno de 10 anos.....	87
Figura 31 — Mancha de inundação máxima gerada no HEC-RAS para o tempo de retorno de 25 anos.	87
Figura 32 — Mapa ilustrativo das velocidades máximas de escoamento em cada do ISF gerada no HEC-RAS para o tempo de retorno de 25 anos.....	88
Figura 33 — Mancha de inundação máxima gerada no HEC-RAS para o tempo de retorno de 50 anos.	89
Figura 34 — Mapa ilustrativo das velocidades máximas de escoamento em cada do ISF gerada no HEC-RAS para o tempo de retorno de 50 anos.....	89
Figura 35 — Mancha de inundação máxima gerada no HEC-RAS para o tempo de retorno de 100 anos.	90
Figura 36 — Mapa ilustrativo das velocidades máximas de escoamento em cada do ISF gerada no HEC-RAS para o tempo de retorno de 100 anos.....	90
Figura 37 — Mancha de inundação máxima gerada no HEC-RAS para o evento histórico de março de 2023.	91
Figura 38 — Mapa ilustrativo das velocidades máximas de escoamento em cada do ISF gerada no HEC-RAS para o evento histórico de março de 2023.....	91
Figura 39 — Profundidade da inundação no Bairro Vila Ivonete para as chuvas de TR 05 e 100 anos.....	92
Figura 40 — Perfil transversal indicando a profundidade da inundação na Avenida Benedito Maia no TR 05 anos	93

Figura 41 — Perfil transversal indicando a profundidade da inundação na Avenida Benedito Maia no TR 100 anos.....	93
Figura 42 — Perfil transversal indicando a profundidade da inundação na Rua Florlirio P Lustosano TR 05 anos.	94
Figura 43 — Perfil transversal indicando a profundidade da inundação na Rua Florlirio P Lustosano no TR 100 anos.	94
Figura 44 — Perfil transversal indicando a profundidade da inundação na Rua Primeiro de Janeiro no TR 05 anos.....	95
Figura 45 — Perfil transversal indicando a profundidade da inundação na Rua Primeiro de Janeiro no TR 100 anos.....	95
Figura 46 — Velocidade máxima do escoamento da inundação no Bairro Vila Ivonete para as chuvas de TR 05 e 100 anos.....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Enquadramento das atuais classes gerais de solo nos grupos hidrológicos do solo.....	41
Tabela 2 – Valores do coeficiente de rugosidade da fórmula de Manning.	65
Tabela 3 — Duração e intensidade da chuva para cada evento.....	73
Tabela 4 - Logradouro e coordenada dos pontos as margens da área de inundação do evento de março de 2023.....	74
Tabela 5 — Área, CN, infiltração potencial máxima e abstração inicial por sub-bacia.	78
Tabela 6 — Comprimento, declividade e desnível do talvegue, tempo de concentração e “lag time” de cada sub-bacia.....	79
Tabela 7 – Parâmetros característicos dos trechos de rio.	79

LISTA DE SIGLA

1D — Uma Dimensão

2D — Duas Dimensões

3D — Três Dimensões

ANA — Agência Nacional de Águas e Saneamento

APP — Área de Proteção Permanente

BHIF — Bacia Hidrográfica do Igarapé Fundo

BHISF — Bacia Hidrográfica do Igarapé São Francisco

BHO — Base Hidrográfica Ottocodificada

CN — *Curve :Number*

COP-30 — Copernicus DEM (1,0 segundos de arco)

DLR — Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Centro Aeroespacial Alemão)

ESA — Agência Espacial Europeia (em inglês: European Space Agency)

EUA — Estados Unidos da América

GPS — *Global Positioning System*

HEC — *Hydrologic Engineering Center*

HEC-HMS — *Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System*

HEC-RAS — Hydrologic Engineers Corps – River Analysis System

HU — Hidrograma Unitário

IBGE — Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDF — Intensidade, Duração e Frequência

INMET — Instituto Nacional de Meteorologia

ISF — Igarapé São Francisco

MDE — Modelo Digital de Elevação

MDT — Modelo Digital de Terreno

NRCS — *National Conservation Service*

PNAC — Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios

PRMB — Prefeitura Municipal de Rio Branco

SB — Sub-Bacia

SCS — *Soil Conservation Service*

SEMEI — Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Rio Branco

SIG — Sistema de Informação Geográfica

SINGREH — Sistema Nacional de Gestão de Recursos Hídricos

SIRGAS — Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

SRTM — *Shuttle Radar Topography Mission*

SWAT — *Soil and Water Assessment Tool*

TR — Tempo de Retorno

UC — Unidade de Conservação

UFAC — Universidade Federal do Acre

UTM — Universal Transversa de Mercator

ZEE — Zoneamento Econômico-Ecológico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	JUSTIFICATIVA	15
3	PROBLEMA E HIPÓTESE.....	18
4	OBJETIVO.....	20
4.1	OBJETIVO GERAL.....	20
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
5	FUNDAMENTAÇÃO DA BASE TEÓRICA E CONCEITUAL.....	21
5.1	CICLO HIDROLÓGICO E BALANÇO HÍDRICO.....	21
5.1.1	Tempo de Retorno	24
5.2	INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO CICLO HIDROLÓGICO ..	26
5.3	INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE URBANIZAÇÃO NO CICLO HIDROLÓGICO	28
5.4	PROCESSO DE OCUPAÇÃO URBANA.....	31
5.5	MODELOS E SISTEMAS	32
5.6	CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS	36
5.7	MODELAGEM HIDROLÓGICA	37
5.7.1	Modelo HEC-HMS.....	37
5.7.2	Curve number	38
5.7.3	Chuva-Vazão	43
5.7.4	O Hidrograma Unitário	44
5.8	MODELAGEM HIDRÁULICA.....	45
5.8.1	Escoamento	45
5.8.2	Modelo HEC-RAS	46
6	METODOLOGIA.....	50
6.1	ÁREA DE ESTUDO	50

6.2 PRÉ-PROCESSAMENTO	53
6.2.1 O modelo digital de terreno (MDT)	53
6.2.2 Delimitação das Sub-Bacias no HEC-HMS	55
6.2.3 A chuva de projeto	58
6.3 A CRIAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO.....	60
6.3.1 Método de Perdas: Método <i>Curve Number</i>	60
6.3.2 Método de Transformação: Hidrograma Unitário	62
6.3.3 Escoamento de Base	64
6.3.4 Método de Escoamento em Canais: Muskingum-Cunge	64
6.4 A CRIAÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO	66
6.4.1 CALIBRAÇÃO	70
7 RESULTADOS E DISCURSÕES	73
7.1 CHUVA DE PROJETO	73
7.2 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO.....	74
7.3 PRÉ-PROCESSAMENTO	78
7.4 MODELOS HIDROLÓGICOS.....	80
7.5 MODELOS HIDRÁULICOS	84
8 CONCLUSÃO.....	99
9 REFERÊNCIAS	100

1 INTRODUÇÃO

Um dos fatores cruciais no processo de transformação da vida nômade para o desenvolvimento de comunidades sedentárias foi a disponibilidade de recursos hídricos próximo a assentamentos. O homem buscou localidades próximas aos rios, pois a água, além de necessária para o consumo, também era essencial para a agricultura, o saneamento e a navegação – incluindo o transporte de pessoas e mercadorias. A habitação à beira dos cursos d’água tem se perpetuado e pode ser observada na maioria das cidades da Amazônia (OLIVEIRA, 2006), por exemplo.

Entretanto, este processo não tem acontecido sem problemas. Durante a segunda metade do Século XX o Brasil passou por transformações socioeconômicas que começaram a gerar um êxodo rural. Como consequência, a concentração de pessoas nas cidades brasileiras tem favorecido a utilização precária da superfície urbana e práticas como o avanço sobre o meio natural de maneira desordenada; a implantação de loteamentos irregulares e a degradação progressiva das áreas de mananciais tem contribuído para o aumento das superfícies impermeáveis (MENDIONDO; MENDES, 2007), o que afeta o ciclo hidrológico.

De acordo com dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) de 2015, a maioria da população brasileira, cerca de 84,72%, vive em áreas urbanas (IBGE, 2015). Esta expansão das zonas urbanas tem desencadeado alterações significativas no ciclo hidrológico, sobretudo por meio da modificação na cobertura do solo, que altera a sua permeabilidade, refletindo nos volumes de escoamento superficial e subsuperficial.

O uso inadequado do solo tem sido, portanto, um dos principais catalisadores do risco de enchentes significativas nas cidades. A expansão do aglomerado urbano é diretamente proporcional ao aumento do risco de ocorrência de inundações, mesmo com a implantação de sistemas de drenagem tradicionais (OLIVEIRA *et al*, 2017).

A intensificação do processo de urbanização, aliado à ausência de medidas estruturais e não estruturais de drenagem urbana, produz um cenário que pode colaborar para o aumento da frequência e magnitude das inundações (DECINA, 2012). Como consequência disso, tem-se degradação ambiental, prejuízos

econômicos e em casos mais extremos tragédias com comprometimento de vidas (TUCCI, 2002).

Durante a estiagem, os corpos hídricos ocupam o seu leito menor. Porém, com o início do período chuvoso, ocorre a elevação do nível da água e, a depender do corpo hídrico, eventos de precipitação podem gerar enchentes quando o volume d'água ocupa toda a seção transversal do canal. Podem ocorrer inundações também quando o rio transborda e a água passa a ocupar planícies fluviais às margens do rio.

A ocorrência desses eventos é determinada, portanto, por uma série de fatores naturais e antrópicos. Segundo Amaral e Ribeiro (2009), os principais fatores naturais são a configuração do terreno; características do sistema de drenagem; intensidade, duração e frequência das precipitações e propriedades do solo, tais como cobertura vegetal e umidade. Já em relação aos fatores antropogênicos, têm-se: uso e ocupação irregular das planícies e margens de cursos d'água; descarte inadequado de lixo e alterações nas características da bacia hidrográfica, como retificação, canalização, impermeabilização, erosão e assoreamento de cursos d'água (MANSANO; SERRANO, 2023).

A minimização do impacto de enchentes, considerando os fatores antropogênicos, depende tanto do poder público quanto da consciência da população que habita áreas inundáveis (BERTONI e TUCCI, 2003). Ou seja, o controle de enchentes é um processo perene em que o estabelecimento de regulamentos, o desenvolvimento e implementação de medidas preventivas está sob a responsabilidade do Estado que, talvez, tenha adotado medidas insuficientes para reduzir o impacto do desenvolvimento urbano sobre os recursos hídricos. Deste modo, é necessário estar atento a potenciais violações da legislação na expansão da ocupação do solo das áreas de risco.

Este cenário gera a necessidade de regulamentação do uso e ocupação do solo através de um plano diretor, que disponha dos índices e instrumentos urbanísticos necessários para o planejamento urbano (VIEIRA *et al*, 2020).

Para isso, modelagens hidrológica e hidráulica constituem uma ferramenta essencial no planejamento da gestão das águas pluviais em bacias urbanas, capaz de antecipar eventos e simular cenários de inundaçao. Essa abordagem visa

estabelecer uma conexão direta entre a descrição de fenômenos físicos, como inundações, e a imposição de restrições ao uso do solo. Embora análises morfológicas tenham sido comumente empregadas para definir as áreas de inundaçāo dos rios, a exigência de associar a inundaçāo a um período de retorno e, consequentemente, a uma medida de risco, destaca a necessidade de recorrer a modelos computacionais hidrológicos (PISTOCCHI; MAZZOLI, 2022).

A modelagem de eventos hidrológicos exige um conhecimento profundo das características do sistema fluvial. Através da caracterização da bacia hidrográfica e do seu canal principal podem ser extraídas informações preciosas para a criação de um modelo hidrológico e hidráulico que seja capaz de simular um cenário crítico de precipitação.

À medida que são implementadas mais estruturas de drenagem na bacia ou sub-bacia, o processo torna-se mais complexo, o que demanda um estudo mais aprofundado das características locais, tais como topografia, hidrologia, aspectos físicos e socioambientais (REZENDE, 2011).

Nesse sentido, as modelagens hidrológica e hidráulica podem fornecer resultados que contribuam com a gestão de risco de desastres nas bacias hidrográficas urbanas, permitindo, por exemplo, delimitar a área de inundaçāo de um curso d'água, a partir de uma condição de contorno. Isso permitirá subsidiar um plano de ação com medidas que visem conter as enchentes e minimizar os riscos associados a problemas ambientais e, também, promover uma cultura de conscientização da população local.

Modelagens hidrológicas e hidráulicas já foram aplicadas em estudos anteriores em vários países tais como Índia (SHANKAR *et al.*, 2018), Myanmar (ZIN; KAWASAKI; WIN, 2015), Estados Unidos (THAKUR *et al.*, 2017), Etiópia (NAMARA; DAMISSE; TUFA, 2021), Brasil (DECINA; BRANDĀO, 2016), por exemplo. Desta forma, o presente estudo se propõe a aplicar a mesma metodologia adotada, a combinação de softwares que trabalham com Sistema de Informação Geográfica (SIG) e os programas computacionais para o desenvolvimento de modelagem hidrológica e hidráulica.

2 JUSTIFICATIVA

Bacias hidrográficas urbanas são áreas mais sensíveis ao impacto causado pelos fatores antropogênicos, a Bacia Hidrográfica do Igarapé São Francisco (BHISF), por exemplo, apresenta uma grande parcela de sua área urbanizada. Inserida na cidade de Rio Branco, a BHISF é uma sub-bacia da Bacia do Rio Acre, afluente do Rio Purus e integra a Bacia do Rio Amazonas. Fornecer dados sobre a bacia do Igarapé São Francisco é contribuir com o conhecimento sobre a Bacia do Rio Amazonas, a disponibilização de dados locais pode auxiliar na criação e implementação de políticas públicas, como por exemplo, a atualização do plano gestor da cidade Rio Branco, assim, contribuindo para o desenvolvimento dessa região geopoliticamente estratégica para o Brasil e o mundo.

É imprescindível conhecer os aspectos hidrológicos em uma região para que se possa ter um panorama da situação local e prever a ocorrência de possíveis desastres naturais. O relatório da Organização Meteorológica Mundial e do Escritório da Organização das Nações Unidas para Redução de Risco de Desastres indica que, num intervalo de 50 anos, entre 1970 e 2019 ocorreram 11 mil desastres atribuídos a eventos climáticos, resultando na morte de 2 milhões de pessoas e 3,47 trilhões de dólares em perdas econômicas. Os desastres meteorológicos, climáticos ou hidrológicos representam 50% de todos os desastres, 45% de todas as mortes e 75% de todas as perdas econômicas registradas no período (OMM, 2021).

No Brasil, a discussão sobre desastres ambientais torna-se ainda mais relevante, considerando que o país aparece entre os 10 países com maior número de vítimas relacionadas a desastres naturais no recorte entre os anos de 1995 e 2015 (CRED/UNISDR, 2015).

Entre os anos de 2013 e 2022, cerca de 93,9% dos municípios brasileiros registraram algum tipo de desastre, ocasionando prejuízos ambientais e sociais que podem gerar, igualmente, impacto econômico em diferentes escalas. Calcula-se, por exemplo, que nesse período o número de moradias danificadas ou destruídas em eventos climáticos extremos ultrapassou 2 milhões e totalizou um prejuízo na ordem de R\$ 26 bilhões, impactando 78% dos municípios do país (CNM, 2023).

Segundo Santos (2006), no período entre 1971 e 2004 a cidade de Rio Branco enfrentou duas enchentes históricas, momento em que o rio extrapolou sua cota de transbordo e causou prejuízos sociais e econômicos relevantes o suficiente para serem documentados e lembrados. O primeiro registro histórico data de 1988, quando a Prefeitura Municipal de Rio Branco (PMRB) declarou estado de calamidade pública: foram cerca de 37 mil desabrigados e ao menos 28 bairros atingidos. Entre os bairros atingidos, estavam a Baixa da Colina e o São Francisco. A segunda enchente registrada na série histórica foi em 1997 e os efeitos da inundação foram ainda maiores, visto que o Rio Acre atingiu a cota de 17,66 m e a população atingida foi superior devido a maior ocupação nas áreas de inundação.

No ano de 2012, a cidade de Rio Branco vivenciou a maior cheia já registrada desde 1997. A cota do Rio Acre ficou a três centímetros do recorde histórico registrado anteriormente.

Entre os meses de fevereiro e março de 2015, Rio Branco registrou um novo recorde histórico. O nível do Rio Acre atingiu 18,40 m, 4 metros acima da cota de inundação do município (TAMWINIG *et al.*, 2021). Na enchente de 2015 cerca de 53 bairros foram invadidos pela água e mais de 83 mil pessoas foram prejudicadas com as enchentes (WWF, 2015).

Na última semana do mês de março de 2023, algumas cidades do estado do Acre, incluindo a capital Rio Branco, registraram elevados índices de precipitação e consequentemente sofreram com inundações de proporções históricas, provocando uma série de prejuízos financeiros, sociais e ambientais. Esta inundação é descrita como uma das maiores, entre as 41 enchentes registradas ao longos de 52 anos de monitoramento (AMARAL, 2023).

Desta forma, esta pesquisa justifica-se, na sua relevância acadêmica, pela contribuição para o desenvolvimento de novos procedimentos metodológicos que possam colaborar para o avanço dos estudos hidrológicos e hidráulicos, com ênfase na avaliação do risco de inundações por meio de simulações hidrológicas em modelos computacionais. Deve-se destacar que o levantamento bibliográfico realizado para esta pesquisa sugere que, até o momento, este é o primeiro estudo que faz uso da combinação de tais processos na análise de um corpo hídrico na Região Norte brasileira.

Este trabalho visa construir um modelo de relatório que poderá ser usado por gestores públicos, mas é necessário destacar que sua realização extrapola aspectos acadêmicos. Tratar sobre enchentes na BHISF possui contornos políticos, pois tem sido matéria de política pública na gestão dos recursos hídricos do Estado do Acre. Além disso, ao ser concluída, esta pesquisa possuirá valor social ao agregar conhecimento sobre uma das principais bacias hidrográficas da região urbana de Rio Branco, por meio de um estudo aprofundado e disponibilização de material capaz de auxiliar a gestão do Sistema Nacional de Gestão de Recursos Hídricos (SINGREH) e na tomada de decisões que podem impactar a vida de milhares de pessoas.

3 PROBLEMA E HIPÓTESE

Tanto Zin; Kawasaki; Win, (2015) quanto Thakur *et al.*, (2017) mapearam áreas de inundação e as identificaram principalmente em regiões urbanizadas, na Bacia Hidrográficas do Rio Bago, em Myanmar, e na Bacia Hidrográfica de Copper Slough, em Champaign, Illinois, EUA, respectivamente. Decina e Brandão (2016) constataram que existe uma tendência de inundação para os tempos de retorno de 25, 50 e 100 anos, com e sem a aplicação de medidas de contenção estruturais e não-estruturais em todos os cenários propostos para bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, em São Carlos, São Paulo. De acordo com Malheiros *et al.* (2020) uma inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Águas Vermelha, em Joinville, Santa Catarina, com um tempo de retorno de 2 anos já seria capaz de interditar vias da cidade.

A Bacia do Igarapé São Francisco é composta por trechos de mata, de pastagem (SILVA; FRANÇA, 2003) e de intensa urbanização ao longo das margens de seu canal principal. Segundo Hid (2000) a faixa de domínio do curso do canal principal da BHISF já era habitada por cerca de 30 mil pessoas nos anos 2000. Existe uma alta taxa de ocupação da Bacia do Igarapé São Francisco, inclusive da Área de Proteção Permanente (APP) que apresenta alto nível de desmatamento flagrante em toda sua extensão, o que afeta a qualidade hidrogeomorfológica do canal principal.

Os eventos de inundações na área urbanizada da Bacia apresentam curtos tempos de retorno, demonstrando a necessidade de um estudo do regime de escoamento para subsidiar as medidas públicas de intervenção.

Em precipitações de duração igual ou superior ao tempo de concentração, a dilatação do tempo de retorno pode acarretar áreas de inundação cada vez maiores. Dadas as condições meteorológicas e topográficas, esse padrão no aumento da mancha de inundação simulada pode apresentar uma tendência proporcional ao aumento da vazão no hidrograma propagado.

De modo semelhante, esta pesquisa busca determinar, através de um modelo hidráulico e hidrológico, a área alagada e o tempo de retorno mínimo em que já

deveriam começar as interdições de vias e a retirada de moradores da área alagada na região urbana da Rio Branco.

Dessa forma, o presente trabalho investigará a seguinte hipótese: “a utilização de modelos hidráulicos e hidrológicos na região urbana da Rio Branco permitirá a previsão das áreas alagadas e do tempo de retorno mínimo, possibilitando a identificação de pontos críticos onde a interdição de vias e a evacuação de moradores devem ser iniciadas. A aplicação desses modelos poderá contribuir para um planejamento eficaz e uma resposta rápida diante de eventos de inundação, minimizando danos e garantindo a segurança da população.”

4 OBJETIVO

4.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é avaliar o risco de inundação na bacia hidrográfica do Igarapé São Francisco, em Rio Branco-AC, por meio do emprego de modelagem hidrológica e hidráulica nos tempos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Estudar as características físico-geográficas da bacia do Igarapé São Francisco a fim de conhecer seu comportamento hidrológico.
- b) Mapear o desempenho da estrutura hidráulica do canal principal da BHISF na contenção dos eventos de inundação na bacia do Igarapé São Francisco.

5 FUNDAMENTAÇÃO DA BASE TEÓRICA E CONCEITUAL

5.1 CICLO HIDROLÓGICO E BALANÇO HÍDRICO

A quantidade total de água presente no globo terrestre permanece praticamente inalterada, desde o surgimento do Homem (COSTA; JUNIOR, 2007). Uma das poucas exceções são os cometas conhecidos como “bola de neve” que, ao se aproximarem da superfície terrestre, vaporizam água na atmosfera. Portanto, com a ausência de outros fenómenos capazes de alterar a quantidade total de água no planeta forma-se o ciclo hidrológico, global e fechado.

O ciclo hidrológico se configura como um sistema global, praticamente fechado, impulsionado essencialmente pela energia proveniente da radiação solar e associado à força gravitacional e à rotação terrestre. Também conhecido como ciclo da água, o ciclo hidrológico pode ser entendido como o agrupamento de processos hidrológicos que ocorrem com a água na natureza e diz respeito ao percurso realizado pela água partindo de um estado inicial até que retorne a esse estado.

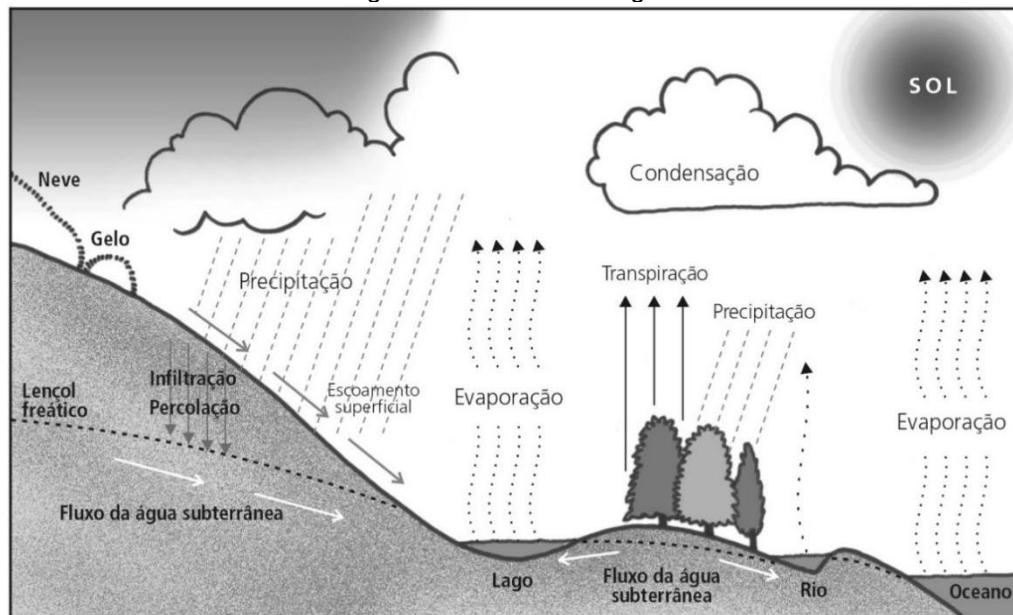
A base conceitual reside na dinâmica das águas subterrâneas, superficiais e na presença do vapor d'água na atmosfera. Apesar do ciclo hidrológico ser contínuo, sua distribuição não é uniforme, resultando em eventos naturais de inundação e escassez hídrica. Contudo, a interferência humana tem exacerbado a gravidade e a frequência desses fenômenos (BAEK *et al.*, 2013). A heterogeneidade na disponibilidade hídrica afeta diretamente a dinâmica populacional, dada a importância crucial da água no progresso socioeconômico.

Existem variações nesse percurso, e o início de sua descrição pode ser feito a partir de qualquer etapa, por ser um ciclo, a circulação de água pelo planeta tende a retornar a um processo já experimentado, como ilustrar a Figura 1.

A água da chuva segue diferentes caminhos após atingir o solo. Parte dela é interceptada pelas árvores e retorna à atmosfera pela evaporação, enquanto outra parte infiltra no solo, atingindo o lençol freático para armazenamento ou escoamento abaixo da superfície. O restante, não interceptado nem infiltrado, forma o escoamento superficial, fluindo pelos cursos d'água da bacia hidrográfica até desaguar no mar.

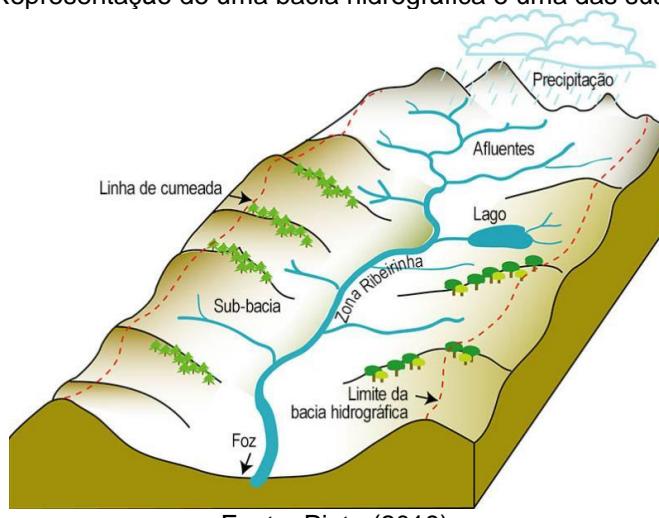
Tanto nos rios quanto no mar, a água evapora, contribuindo para a formação de mais vapor d'água na atmosfera e, consequentemente, mais chuva (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

Figura 1 — Ciclo hidrológico.



Fonte: Fundação CECIERJ (2011).

Figura 2 — Representação de uma bacia hidrográfica e uma das suas sub-bacias.



Fonte: Pinto (2019).

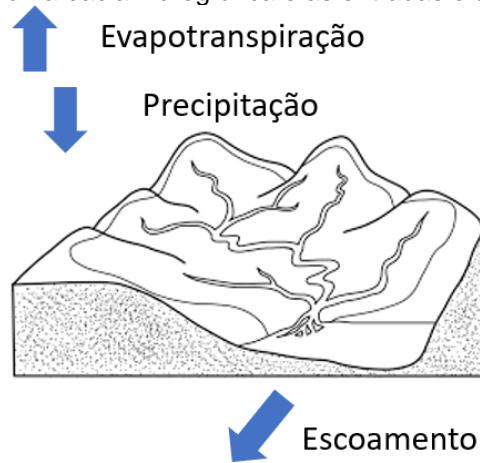
De acordo com Tucci (1997), a bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água de precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída Figura 2. A bacia hidrográfica é primordial para análise local do ciclo hidrológico aberto, ela se configura com objeto de estudo de inúmeras pesquisas na

hidrologia, pois fornece um recorte espacial, delimitando uma área de abrangência para os fenômenos hidrológicos de interesse.

O conhecimento dos processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica é fundamental para a condução das atividades relacionadas ao uso da água, sendo o balanço hídrico uma ferramenta de grande relevância para o gerenciamento de recursos hídricos.

Diversos modelos estatísticos e matemáticos são utilizados para simular os processos hidrológicos, principalmente através do balanço hídrico. Esse balanço é uma espécie de "contabilidade" que compara as entradas e saídas de água em uma bacia hidrográfica. De maneira simplificada, a água entra na bacia principalmente pela precipitação, enquanto sua saída ocorre por meio da evapotranspiração ou do escoamento superficial (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013, Figura 3).

Figura 3 — Relevo de uma bacia hidrográfica e as entradas e saídas de água.



Fonte: (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013.) adaptado pelo autor.

O balanço hídrico exige que seja satisfeita a seguinte equação:

$$\frac{dV}{dt} = P - E - Q \quad (1)$$

Onde, P é o volume de água precipitado, E é a evapotranspiração e Q é o escoamento. Definindo um intervalo de tempo finito Δt , a variação do volume armazenado na bacia ΔV , pode ser reescrita como:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = P - E - Q \quad (2)$$

E caso sejam adotados tempo longos, como períodos de que abrangem vários anos, pode-se desprezar a variação do volume armazenado na bacia, de forma que a equação do balanço hídrico para longos períodos é Equação 3:

$$P = E + Q \quad (3)$$

5.1.1 Tempo de Retorno

O conceito de tempo de retorno está relacionado à probabilidade de ocorrência de um evento em um determinado período. É uma medida utilizada para estimar a frequência com que eventos extremos, como chuvas intensas, cheias de rios ou outros fenômenos naturais, podem acontecer ao longo do tempo.

O tempo de retorno, medido em anos, representa o intervalo médio entre a ocorrência ou a superação de um evento específico. Por exemplo, se um evento tem um tempo de retorno de 100 anos, isso indica que, estatisticamente, esperamos que ocorra uma vez a cada 100 anos, em média (GENOVEZ, 2001).

É comum ocorrer confusão entre os termos "tempo de retorno" e "probabilidade". A probabilidade, geralmente expressa como uma porcentagem ou fração, indica a frequência esperada desse evento em relação ao total de eventos possíveis.

Em termos matemáticos tempo de retorno e probabilidade estão associados, sendo um o inverso do outro.

$$Tr = \frac{1}{p} \quad (4)$$

$$p = \frac{1}{Tr} \quad (5)$$

Onde:

(Tr) é o tempo de retorno em anos;

(p) é a probabilidade de o evento ocorrer em um determinado ano.

Esses conceitos são cruciais para o dimensionamento de projetos de infraestrutura que devem suportar eventos extremos. Como é o caso de pontes, barragens, obras de drenagem e outras construções que são projetadas assumindo um Tempo de Retorno como critério de “risco”.

Cabe ao projetista amparado pelas normas técnicas equilibrar o critério econômico, pois o superdimensionamento pode aumentar os custos e tornar a obra inviável, enquanto o dimensionamento insuficiente pode causar transbordamentos e riscos à população.

Essa abordagem é valiosa para o dimensionamento de estruturas e infraestruturas, como barragens, canais, sistemas de drenagem, e outras obras civis, ajudando a determinar as condições críticas para as quais as estruturas precisam ser projetadas para garantir segurança e eficiência ao longo do tempo.

Diante da necessidade de garantir segurança nos projetos e é crucial na avaliação do potencial de danos, para isso destaca-se o conceito de risco de desastre, que de acordo com o Glossário de Defesa Civil, pode ser definido como a relação entre a probabilidade de ocorrência de um evento adverso específico e o grau de vulnerabilidade do sistema receptor aos seus impactos. Essa relação reflete a estimativa da probabilidade e magnitude dos danos em um determinado cenário, considerando a interação entre a ameaça em questão e as características de vulnerabilidade ou capacidade do sistema afetado.

Essa estimativa combina a avaliação da chance de o evento adverso ocorrer com a compreensão das características do sistema receptor que o tornam mais ou menos suscetível aos seus efeitos. Isso abrange não apenas a probabilidade de o evento acontecer, mas também a extensão e intensidade dos danos esperados, levando em consideração a capacidade do sistema em lidar com esses impactos, seja por meio de medidas preventivas, preparatórias ou de resposta (CASTRO, 1998).

Em suma, a avaliação conjunta da probabilidade de ocorrência de um evento adverso e da vulnerabilidade do sistema receptor proporciona uma visão mais abrangente dos possíveis danos e prejuízos que podem resultar dessa interação entre a ameaça e o contexto em que ela se manifesta.

Christofoletti (1999: pg 146) traduz "natural hazards" para "azares naturais", porém, o autor não aprofunda essa questão semanticamente. Entende-se que o risco se refere a uma ameaça provável, frequentemente associada a um componente probabilístico, diferenciando-se do azar, que pode ser quantificável ou não. Por sua vez, o azar ou perigo pode ser descrito como um evento prejudicial com potencial para causar danos significativos, sendo a concretização do desastre ambiental. Dessa forma, o risco se relaciona à probabilidade de ocorrência de um evento prejudicial, enquanto o azar é sua materialização (MARANDOLA; HOGAN, 2004).

5.2 INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO CICLO HIDROLÓGICO

As atividades humanas estão liberando na atmosfera minúsculas partículas, chamadas de aerossóis. Esses aerossóis produzidos pelo homem aumentam a dispersão e a absorção da radiação solar. Em escala regional, os aerossóis antropogênicos já estão afetando o aquecimento atmosférico e a precipitação (RAMANATHAN, 2001).

A influência humana no ciclo hidrológico em relação a disponibilidade de água e o risco de desastres naturais de causas hidrológicas vem sendo amplamente debatida. Pesquisas apontam uma relação de desequilíbrio nas interações do ciclo hidrológico, profundamente afetado pelas atividades humanas relevantes no desenvolvimento socioeconômico (YANG; YANG; XIA, 2021).

Com as recentes mudanças rápidas no clima e no uso da terra, o ciclo global da água está experimentando altos níveis de variabilidade espacial e temporal. Há indícios de que temperatura média global do ar na superfície aumentou durante o século XX (IPCC, 2013).

A intensificação do ciclo da hidrológico pode levar a mudanças na disponibilidade de recursos hídricos, um aumento na frequência e intensidade de tempestades tropicais, inundações e secas, além de um aumento do aquecimento (HUNTINGTON, 2006).

Huntington (2006) salienta que há um obstáculo nas pesquisas sobre a influência do aquecimento global no ciclo hidrológico, os dados são frequentemente incompletos nos domínios espacial e temporal e as análises regionais são variáveis e às vezes contraditórias, entretanto há evidências que apontam para uma intensificação contínua do ciclo da água. Em contrapartida em algumas regiões do planeta não existem evidências empíricas até o momento, robustas o suficiente para estabelecer a tendência em escala global de aumento na frequência ou intensidade de tempestades e inundações tropicais.

Snyder *et al.* (2019) analisou as regiões do planalto de Columbia e da Grande Bacia no contexto do oeste dos Estados Unidos. Nos dados entre 1985 e 2011 se observou um aumento de temperatura de 0,7 a 1,4°C, mas as mudanças na precipitação foram relativamente pequenas, sem tendências claras. Já as projeções climáticas realizadas para a área de estudo, num horizonte de 2020 a 2050 indicam que as temperaturas continuarão a aumentar, especialmente no inverno e durante a noite. A precipitação é mais difícil de projetar e as estimativas variam de uma redução de 11% a um aumento de 25%, dependendo da localização dentro da área de estudo.

Com relação a floresta tropical, o cenário de conversão acelerada da Floresta Amazônica em pastagens ou lavouras provavelmente resultará em mudanças expressivas no microclima regional. Como efeito disso, projeta-se: reduções na precipitação, diminuição da evapotranspiração, aumentos na temperatura do ar, maiores amplitudes térmicas durante o dia, aumento do escoamento durante o período de cheia e a diminuição durante a seca (SALATI; NOBRE, 1991)

Amorim, Senna, Cataldi (2019) avaliaram os efeitos de longo prazo do desmatamento da Amazônia sobre a precipitação no Brasil, em grande parte da Região Norte, oeste da Região Nordeste e norte da Região Centro-Oeste foram simuladas anomalias negativas de precipitação e positivas de temperatura, o que pode vir a afetar o regime chuvoso dessas regiões.

O aumento contínuo das emissões de gases do efeito estufa intensificam o fenômeno de aquecimento global, um dos riscos associados a esse fenômeno é a alteração dos padrões de evapotranspiração. De acordo com Gomes, Leite-Filho, Soares-Filho (2021) o aumento da evapotranspiração é maior nas regiões da Bacia Amazônica Brasileira em que há maior aumento da temperatura em conjunto com o avanço do desmatamento, destaca-se ainda que as simulações indicam acréscimo da evapotranspiração durante a estação seca (maio a setembro) e redução durante o período chuvoso (novembro a março), condição extremamente prejudicial à agricultura e ao abastecimento urbano.

5.3 INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE URBANIZAÇÃO NO CICLO HIDROLÓGICO

Tucci (2007) observou um aumento considerável na frequência de grandes inundações ao longo do século XX. Esse período coincidiu com um significativo aumento na atividade antropogênica, levando à especulação sobre uma possível correlação entre esses eventos.

No âmbito das mudanças climáticas, agravadas pelas ações humanas, a discussão sobre como esses fatores podem influenciar a intensificação do ciclo hidrológico, potencialmente aumentando os riscos de inundações ou enchentes, tem sido objeto de interesse entre os pesquisadores (MILLY, SHMAKIN; 2002).

O entendimento das complexas interações entre mudanças climáticas impulsionadas pela atividade humana e seus impactos no ciclo hidrológico é fundamental para avaliar e gerenciar os riscos associados a eventos extremos, como inundações. Essa análise é crucial para orientar estratégias de adaptação e resiliência diante das transformações em curso.

Geralmente observa-se que a urbanização causa um aumento do volume de escoamento superficial devido aos maiores pico de águas fluviais gerados por superfícies impermeáveis.

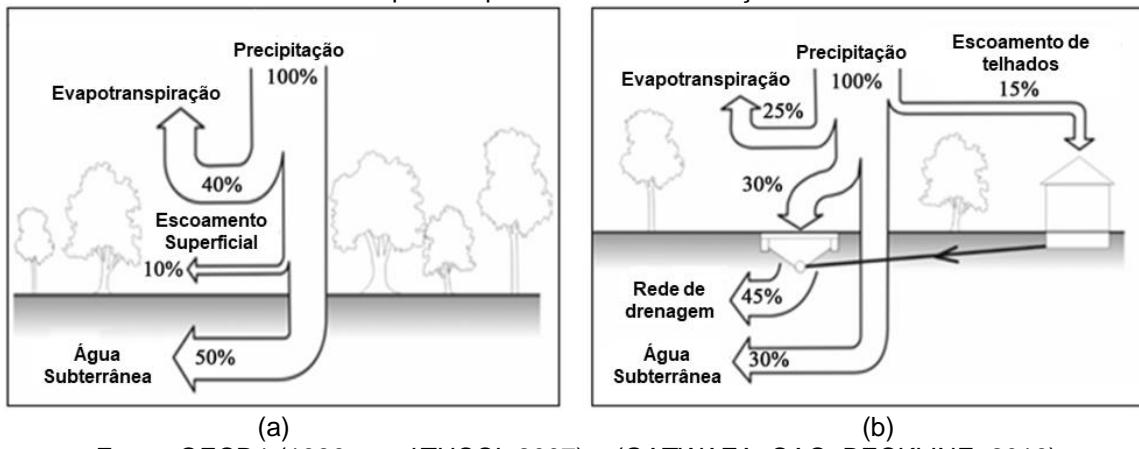
Numa avaliação de impacto da urbanização na Bacia de Migina em Butare, no sul de Ruanda, observou-se um aumento no risco de inundação associado ao crescimento de 3,5% da taxa de escoamento superficial entre os anos hidrológicos de

1974 e 2010. O estudo também observou que no mesmo período houve uma diminuição 3% da evapotranspiração e de 0,5% no nível das águas subterrâneas (GATWAZA; CAO; BECKLINE, 2016). As possíveis causas relacionadas a esses números são o crescimento populacional urbano de cerca de 90% entre os anos pesquisados, a retirada de espaços verdes que contribuíam com o ciclo hidrológico, por meio da diminuição da evapotranspiração e a impermeabilização do solo que cessa a infiltração. Esse desequilíbrio do ciclo hidrológico pode levar a escassez de água durante a estiagem e sucessivas inundações durante o período de cheias.

Zhang *et al.* (2020) investigou a variação do ciclo hidrológico utilizando sensoriamento remoto de alta precisão nos anos de 2000, 2005, 2010 e 2015 e aplicação de modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), em Su-Mi-Huai, Pequim, China. O estudo mostra que houve uma conversão de áreas de cultivo em terrenos edificados entre 2000 e 2015. Essa mudança fez com que o escoamento na área aumentasse em 7×10^6 m, o coeficiente de escoamento superficial aumentou 17,9% e o coeficiente de infiltração da precipitação foi inferior ao valor empírico determinado pela litologia. Ainda, observou-se que o processo de urbanização acarretou uma redução na taxa de infiltração num ano de precipitação normal típico de 3,6% e em um ano mais seco 38%.

O processo ocupacional do território – registrado pelo avanço de cidades em áreas originalmente tidas como rurais – é um fator determinante para o aumento de superfícies impermeáveis, que se constituem como camadas sobrejacentes ao solo natural e impossibilitam a percolação vertical de água, acentuando o escoamento natural das chuvas em direção aos córregos e rios, como na Figura 4.

Figura 4 — Balanço hídrico em uma bacia hidrográfica: (a) antes do processo de urbanização e (b) depois do processo de urbanização.



Fonte: OECD1 (1986 *apud* TUCCI, 2007) e (GATWAZA; CAO; BECKLINE, 2016)

Além do aumento do escoamento superficial, também há estudos que relacionam o uso e ocupação do solo e sua influência na intensidade e magnitude da precipitação nas bacias hidrográficas urbanas. Um dos fenômenos que atuam nessa relação são as ilhas de calor, geralmente responsáveis pela maior temperatura no centro das cidades em relação às áreas circundantes, devido a energia térmica retida pelas construções e atividade humana concentrada na área urbana (YAMAMOTO, 2006).

Entre os fatores causadores do efeito ilha de calor está a substituição da vegetação por estruturas edificadas. As estruturas urbanas absorvem a energia solar, sobretudo os pavimentos escuros (QIN, 2015), o que resulta numa temperatura da superfície mais alta em relação a temperatura do ar ambiente e, à medida que as superfícies se tornam mais quentes, a temperatura ambiente geral aumenta, esse aumento geral da temperatura pode chegar a até 10°C, conforme registrado Atenas, na Grécia, em áreas urbanas e suburbanas durante o verão de 1997 (SYNNEFA, A. *et al.* 2008)

O aumento da temperatura da superfície do solo causado pelo fenômeno ilhas de calor é uma característica marcante do clima urbano. Sua influência pode ser percebida na maneira como altera estrutura e funções ecossistemas urbanos, exercendo uma série de efeitos ecológicos e ambientais nas propriedades do solo, no clima, na hidrologia e no ambiente urbano como um todo (YANG *et. al.*, 2016)

Características do espaço urbanizado como edificações e infraestrutura podem alterar a convecção das massas de ar em áreas urbanas. Além disso, a rugosidade da superfície pode afetar a circulação do ar. E ainda, a presença de aerossóis em áreas urbanas também pode influenciar o clima local.

O efeito das ilhas de calor na precipitação pode ser observado no verão no aumento da incidência e intensidade de precipitação (BORNSTEIN; LIN, 2000; DIXON; MOTE, 2003).

5.4 PROCESSO DE OCUPAÇÃO URBANA

A fundação do Município de Rio Branco ocorreu às margens do Rio Acre, no centro da cidade, onde se desenvolveu uma área de intenso comércio popular e de estruturas civis. Contudo, a ausência de um planejamento urbano adequado durante sua criação resultou na formação gradual da cidade por meio de ramais, culminando em um processo desordenado com assentamentos precários, particularmente em áreas de habitação irregular nas margens dos rios e igarapés. Esse cenário foi agravado por questões socioeconômicas, características climáticas próprias da região amazônica e pela notória falta de saneamento básico, contribuindo significativamente para a disseminação de doenças, especialmente aquelas relacionadas à água (ALVES, 2014).

O Brasil vivenciou um intenso êxodo rural a partir da década de 70 e o Acre não foi exceção. Rio Branco recebeu um grande volume desta massa migratória, conforme se pode verificar a partir da evolução da taxa de urbanização do município - percentual de moradores residentes na área urbana em relação à população total – entre 1980 e 2010 (taxa mais recente) ouve um salto de 74,83% para 91,82%, a taxa rio-branquense de 2010 é maior que a taxa nacional (84,4%) e que a estadual (72,56%) do mesmo ano, o que expressa uma concentração demográfica em Rio Branco superior à média brasileira e acreana (IBGE, 2012).

O processo de urbanização em expansão pode provocar mudanças substanciais no ciclo hidrológico dessas regiões (HUNTINGTON, 2006), decorrentes da modificação da superfície, canalização do escoamento e aumento da poluição

resultante da contaminação do ar, do ambiente urbano e do descarte inadequado de resíduos pela população. O enfoque localizado e setorizado sobre as obras e o controle público de drenagem tem sido adotado para lidar com esses problemas, porém, muitas vezes, isso acarreta impactos adicionais, agravando as condições já existentes e resultando em uma alocação ineficiente dos recursos financeiros disponíveis (TUCCI, 2003).

O Estado do Acre (principalmente sua capital, Rio Branco) sofre de problemas ambientais relacionados aos cursos d'água. Devido à baixa pluviosidade no verão, o sistema de abastecimento de água opera com grande dificuldade. Na estação chuvosa (inverno amazônico), o excesso de oferta causa inundações (ACRE, 2012).

Neste caso, são necessários conceitos modernos de drenagem urbana para compensar o impacto da urbanização sobre o processo hidrológico, levando em consideração seus benefícios para a sociedade e a proteção ambiental, sempre buscando integrar a drenagem urbana ao planejamento urbano-ambiental. Ou seja, torna-se necessário o desenvolvimento e implantação de projetos de engenharia que busquem o desenvolvimento sustentável (OLIVEIRA, 2011).

Assim, o planejamento urbano é primordial para que se tenha um serviço de drenagem capaz de diminuir a erosão responsável por deslizamentos de encostas e o transporte de lixo e outros poluentes para dentro dos corpos hídricos. Isso é importante não só para evitar efeitos negativos das chuvas a curto prazo, mas para auxiliar também, na gestão das bacias hidrográficas, a fim de evitar a perda de rios e lagos devido ao seu assoreamento.

5.5 MODELOS E SISTEMAS

Na segunda metade do século XX, houve uma transformação radical de perspectiva e propósito na geografia, caracterizada por uma revolução quantitativa. Burton (1963) observou uma mudança significativa na geografia física, que passou a adotar uma abordagem mais matemática, com maior ênfase na construção e testes de modelos teóricos. Ele atribuiu essa mudança ao impacto do trabalho de profissionais não-geógrafos, como físicos e matemáticos, que estavam aplicando

abordagens matemáticas à geografia, influenciando diretamente a evolução e a metodologia da disciplina.

Uma das características da revolução foi um empréstimo maciço de ideias de outras disciplinas, mas mantendo-se fiel aos conceitos da Teoria Geral dos Sistemas. Isso permitiu que informações extraídas sobre as características de um sistema real fossem usadas para apresentar as propriedades de outro sistema ainda pouco conhecido (VON BERTALANFFY, 1962). Desta forma, a Teoria Geral dos Sistemas analisa a natureza por meio da relação entre seus diversos componentes e as leis que regem essas relações.

Em diferentes áreas do conhecimento o termo “sistema” é peça central na compreensão de padrões e interações, Dooge (1973) parte das ideias relacionada na engenharia, administração e computação que já contavam com conceitos relacionados a “agrupamento de coisas em partes conectadas”, “interconexão” e “entradas e saídas”. O autor resumiu bem a ideia de sistemas aplicados a hidrologia, para ele:

"Um sistema é qualquer estrutura, dispositivo, esquema ou procedimento, real ou abstrato, que inter-relaciona, em uma referência de tempo específica, uma entrada, causa ou estímulo, de matéria, energia ou informação, e uma saída, efeito ou resposta, de informação, energia ou matéria" (DOOGE, 1973).

Essa ideia de sistema integrado utilizada na formulação de modelos advém da observação de Von Bertalanffy (1962) de que o mesmo processo do conhecimento pode ser aplicado em diferentes áreas, como a probabilidade que pode ser utilizada tanto na análise genética, quanto na contratação de um seguro de vida. A partir dessa observação o autor extrapolou as leis dos sistemas biológicos, que regem os processos como crescimento e adaptação, aplicando às áreas de psique humana, às instituições sociais, e ao conjunto global da ecosfera. Semelhante ao processo que ocorre com o modelo analógico, que se beneficia da analogia entre as equações que regem diferentes fenômenos, tornando possível construir um sistema que simule

ambos os fenômenos através da modelagem baseada na equação mais econômica (Tucci, 2005).

Um modelo, de acordo com Tucci (2005), é “a representação de algum objeto ou sistema numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso com o objetivo de entendê-lo e buscar respostas para diferentes entradas”. Os modelos podem ser classificados em três diferentes tipos, físicos, matemáticos (KANASHIRO, 2011) e analógicos (Tucci, 2005).

Os modelos físicos representam o sistema através de um protótipo e valem-se da teoria da semelhança para representar a realidade em tamanho real ou reduzido, entretanto ressalta-se os efeitos da escala, que pode ser minimizado fixando um dos adimensionais dos sistemas.

Para agrupar os diferentes parâmetros é necessário encontrar uma linguagem adequada que facilite e racionalize o pensamento. A matemática muitas vezes é utilizada para sintetizar e agregar grande quantidade de informação pertinente ao fenômeno estudado (BASSANEZI, 2010). Por isso os modelos matemáticos baseiam-se em princípios e leis matemáticos e utilizam equações para simular o comportamento do sistema estudado. Geralmente emprega-se a modelagem matemática por meio de softwares, por possuírem maior capacidade de cálculo (KANASHIRO, 2011).

A modelagem fortaleceu significativamente nas últimas décadas, avanços tecnológicos possibilitaram computadores mais rápidos e o aprimoramento das técnicas de geoprocessamento, o que contribuiu para o desenvolvimento de modelos cada vez mais complexos, permitindo aos geógrafos físicos a modelagem espacial mais eficaz, capaz de simular a realidade e fornecer respostas mais precisas aos problemas vivenciados na paisagem (GAILE; WILLMOTT, 2004).

Com isso, atualmente, passou a ser mais factível a exploração de problemas geográficos e ambientais recorrentes no decurso do tempo, porque a linguagem computacional permitiu a criação de novos softwares que fornecem um arsenal de possibilidades de combinações de variáveis e métodos de cálculos para se obter uma simulação útil da realidade. Geralmente, a construção de um modelo físico requer

como variável no processo de modelação, as características espaciais da área de estudo.

As limitações nos modelos hidrológicos incluem questões relacionadas à quantidade e qualidade dos dados hidrológicos disponíveis, a complexidade na representação matemática de certos processos e a simplificação de variáveis associadas a fenômenos complexos. A escolha dos métodos para obter essas variáveis depende da escala da área em estudo, podendo ser adotados métodos computacionais ou manuais.

Embora os dados sobre clima, relevo, vegetação e solos sejam coletados em diversas escalas espaciais, esses processos frequentemente são modelados com uma resolução mais grosseira do que sua variabilidade natural real. Isso apresenta um desafio significativo para os pesquisadores, pois a obtenção de uma base de dados refinada o suficiente é essencial para obter resultados mais significativos em seus estudos (GAILE; WILLMOTT, 2004).

O rigor na discretização das variáveis que compõem o ambiente pesquisado é imprescindível para a eficiência do modelo em construção. No entanto, Wainwright e Mulligan (2013) atentam para o conceito de parcimônia na modelagem científica, basicamente, formular o modelo de forma menos complexa possível, ou seja, descrever o real dentro do modelo usando o menor número de variáveis praticável. Pois a disponibilidade de dados e recursos para modelar um sistema é, quase sempre, maior do que a disponibilidade dados para a sua calibração.

Ocorre que essa economicidade pode facilitar o trabalho do pesquisador, uma vez que num certo grau da modelagem, aumentar a complexidade do modelo não irá trazer benefícios proporcionais ao esforço emprenhado pelo construtor, sendo interessante reduzir a complexidade ao mínimo necessário, assim o melhor modelo geralmente configura-se como aquele que alcança o maior realismo com a menor complexidade de parâmetros.

A modelagem científica constitui-se de uma ferramenta teórico-metodológica que fornece ao seu operador condições de aproximar a teoria da realidade (BRANDÃO; ARAUJO; VEIT, 2011), mas para que essa aproximação da realidade

ocorra, de fato, o modelo deve passar por um processo de parametrização, calibração e validação.

5.6 CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS

Antes de adentrar nas características dos modelos é importante entender como são classificados os modelos e sistemas que representam fenômenos hidrológicos e hidráulicos.

A depender do comportamento no tempo, os sistemas podem se contínuos ou discretos. Modelos contínuos são usados para representar fenômenos que não podem ser limitados no tempo. Como é o caso de um modelo contínuo de escoamento de água em um canal ou o comportamento de um rio. Os modelos discretos, ao contrário dos modelos contínuos, representam fenômenos que são limitados no tempo. É comum que sistemas contínuos sejam representados por modelos discretos que retratam apenas um recorte de tempo do sistema inicial, isso ocorre principalmente porque a modelagem é restringida a capacidade de obtenção dos dados necessários (TUCCI, 2005).

Os fenômenos que integram os sistemas não são abstratos, eles são especializados e apresentam grande heterogeneidade. Tomando uma bacia hidrográfica com sistema, por exemplo, haverá certamente diferentes tipos de uso e cobertura do solo, além do que a própria precipitação não é homogênea em toda a bacia hidrográfica.

Desta forma, os modelos distribuídos consideram essas peculiaridades do espaço, enquanto os modelos concentrados partem da simplificação das características que diferenciam as várias partes do sistema. Ainda com relação aos modelos distribuídos Tucci (2005) salienta que eles podem ser distribuídos em módulos (partes que possuem parâmetros iguais), ou em sub-bacias, este último é mais detalhado no capítulo de metodologia. Porém existe uma peculiaridade nessa questão, o modelo distribuído por sub-bacias é considerado distribuído quando é realizada a análise global, porém, individualmente, cada sub-bacia é considerada um sistema concentrado (KAISER 2006). Essa simplificação não é necessariamente

negativa, ao contrário, é uma abordagem prática para substituir um processo distribuído e mais complexo. Isso é feito na tentativa de preservar as características essenciais do protótipo original (PONCE; HALKINS, 1996). Essa simplificação é muitas vezes um meio viável de capturar aspectos fundamentais sem precisar lidar com toda a complexidade do processo.

Outra categorização relevante é a divisão entre modelos conceituais e empírico. Modelos conceituais são aqueles que aplicam as equações físicas na descrição de fenômenos dentro do sistema, enquanto os modelos empíricos são ajustados com base em valores observados em campo, por meio de procedimentos que não têm uma relação física direta com os processos envolvidos.

Modelos ainda podem ser classificados quanto ao uso de estatística para determinação das saídas do sistema. Os modelos estocásticos, segundo Dodge (1973, pg. 19) apresentam uma aleatoriedade tanto nas entradas quanto nas saídas e para uma mesma condição de entrada podem não necessariamente apresentar as mesmas saídas, diferente do modelo determinístico, que não usa processos aleatórios. Vale destacar que mesmo com certo grau de aleatoriedade nas entradas do sistema, como é caso da precipitação no modelo de chuva-vazão, ainda assim o modelo é considerado determinístico, uma vez que só se apoia em processos estatísticos para as variáveis de entrada, enquanto o comportamento do modelo continua sendo determinístico para a definição das saídas.

5.7 MODELAGEM HIDROLÓGICA

5.7.1 Modelo HEC-HMS

O avanço do homem sobre a paisagem natural reforçou uma demanda de estudos impacto, para avaliar projetos e suas consequências. A modelagem hidrológica é realizada com o propósito de entender, simular e prever o comportamento de sistemas hidrológicos e para auxiliar no desenvolvimento de soluções sustentáveis de gerenciamento de risco de inundação (TUCCI, 2005). É

usada também no planejamento de portos, barragens e outros projetos de infraestrutura envolvendo mares e rios (USACE, 2013).

O *Hydrologic Engineering Center* (HEC) oferece um conjunto de softwares para modelagem hidrológica e hidráulica. Esses programas estão disponíveis gratuitamente e são usados em todo o mundo. O software mais difundido para a construção de modelos hidrológicos é o *Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS), uma ferramenta gratuita, projetada para simular os processos de precipitação e escoamento de sistemas dendríticos em bacias hidrográficas (KNEBL, 2005).

O HEC-HMS é capaz de simular eventos de precipitação e escoamento de bacias hidrográficas, por meio de processos que envolvem a determinação da relação chuva-vazão, com base nas características da bacia. Para modelar o escoamento superficial, o software utiliza a equação básica do balanço hídrico, levando em consideração os principais parâmetros que governam o escoamento (USACE, 2013).

As variáveis de entrada empregadas na modelagem hidrológica no HEC-HMS dizem respeito as características físicas da bacia hidrográfica, volume de precipitação ou vazão do corpo hídrico, características de relevo, uso e ocupação do solo e informações de simulação (por exemplo, intervalo de tempo, hora de início da simulação e hora de término da simulação). Há a possibilidade de criar a configuração da bacia hidrográfica a partir da rede de drenagem inserindo áreas, trechos de rios, e junções manualmente ou gerar automaticamente através de um Modelo Digital de Elevação (MDE).

Os dados de saída incluem hidrogramas (vazão ao longo do tempo) e volume de escoamento. Além disso, o HEC-HMS pode ser usado para otimizar parâmetros e realizar análises incertas. Alguns dos pontos fortes do programa são sua capacidade de agregar e desagregar dados temporais, bem como sua capacidade de converter unidades facilmente. HEC-HMS é frequentemente utilizado para gerar hidrogramas que servem como condições de contorno em modelos hidráulicos como HEC-RAS.

5.7.2 Curve number

O HEC-HMS permite ao modelador escolher vários métodos de cálculo de perda por infiltração (USACE, 2013), entretanto, apenas o método *curve number* (CN) permite cálculos de infiltração distribuídos espacialmente (KNEBL, 2005).

O método CN é um modelo hidrológico que combina a simplicidade dos modelos empíricos e a aplicabilidade mais ampla dos modelos mais rigorosos de base física (DOOGE, 1977). Foi desenvolvido pela *Soil Conservation Service* (SCS), atual *National Resources Conservation Service* (NRCS) e é mm dos métodos mais utilizados em estudos e projetos hidrológicos para o cálculo de perdas (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

Por se tratar de um modelo concentrado, ignora a variação temporal da chuva e descreve tendências médias, o que o impede de ser perfeitamente previsor (PONCE; HALKINS, 1996). Todavia isso não é exatamente um problema. Na verdade, ele fornece praticidade ao hidrólogo e pode substituir os complexos modelos distribuídos.

O método SCS está baseado na equação do balanço hídrico (Equação 3), que foi adaptada para:

$$P = I_a + F + Q \quad (6)$$

Onde (P) é a precipitação ocorrida ao longo do evento de chuva em mm; (Q) é a chuva efetiva ou escoamento superficial em mm; (F) infiltração total durante o evento chuvoso em mm; (I_a) é a abstração inicial correspondente a todas as perdas durante o início do evento, incluindo perdas por acúmulo de água na superfície, interceptação e infiltração antes do início do escoamento inicial.

O método SCS CN considera que, em uma determinada bacia hidrográfica, durante a extensão de um evento de chuva, a razão entre o volume do escoamento superficial (Q) e o volume total de Precipitação (P) é equivalente a razão entre o volume acumulado de infiltração (F) até aquele momento e o volume da infiltração potencial máxima (S). Essa relação é detalhada na Equação 7 a seguir.

$$\frac{Q}{P - I_a} = \frac{F}{S} \quad (7)$$

Parte da chuva será perdida logo no início da precipitação, seja por evaporação ou por dificuldade de escoamento em região acidentada da bacia hidrográfica. Desta forma, a abstração inicial reflete volume em mm que se perde logo no início da chuva e é calculada no método SCS como sendo 20% da infiltração potencial máxima, dada pela Equação 8:

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (8)$$

Onde S é infiltração potencial máxima e CN o índice *curve number* obtido para a sub-bacia.

Com base nas considerações de proporcionalidade da equação 7 e I_a é 20% da infiltração potencial máxima, podemos reescrever a equação do balanço hídrico.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} \quad (9)$$

O objetivo do método SCS-CN é determinar a precipitação efetiva de um evento em função da capacidade de infiltração do solo e produção de escoamento. O índice CN está relacionado às condições de umidade antecedentes, ao grupo hidrológico e a forma de uso e ocupação do solo. CN é adimensional e varia entre 0 e 100, sendo que maiores valores acarretam maior escoamento superficial.

A metodologia do SCS-CN, classifica os solos em quatro grandes grupos hidrológicos, representados pelas letras A, B, C e D, de acordo com suas características relacionadas a infiltração e produção de escoamento.

Essa classificação baseia-se na premissa de que solos de mesma região climática e semelhantes em profundidade, taxa de transmissão de água, textura, estrutura e grau de expansão quando saturados, responderão de forma similar a chuvas de grande duração e intensidade considerável.

No Brasil, usuários do método tendem a considerar apenas a textura superficial do solo para enquadrá-los em um dos grupos hidrológicos, utilizando a classificação original do SCS (SARTORI; LOMBARDI NETO; GENOVEZ, 2005).

No entanto, a classificação hidrológica dos solos brasileiros foi adaptada por Sartori, (2004) visando garantir aplicabilidade do método do SCS-CN na classificação de áreas de drenagem com base em sua constituição pedológica. A Tabela 1 apresenta a relação entre grupos hidrológicos e classes de solo utilizando a nomenclatura padronizada pela Embrapa.

Tabela 1 — Enquadramento das atuais classes gerais de solo nos grupos hidrológicos do solo.

Grupo	Principais Características	Classes gerais de solo
A	Solos muito profundos (prof. > 200 cm) ou profundos (100 a 200 cm); Solos com alta taxa de infiltração e com alto grau de resistência e tolerância à erosão; Solos porosos com baixo gradiente textural (< 1,20); Solos de textura média; Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione alta macroporosidade em todo o perfil; Solos bem drenados ou excessivamente drenados; Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1; A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: média/média, argilosa/argilosa e muito argilosa/muito argilosa.	LATOSSOLO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO, ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macroporosidade; LATOSSOLO AMARELO E LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial não arenoso;
B	Solos profundos (100 a 200 cm); solos com moderada taxa de infiltração, mas com moderada resistência e tolerância à erosão; solos porosos com gradiente textural variando entre 1,20 e 1,50; solos de textura arenosa ao longo do perfil ou de textura média, mas com horizonte superficial arenoso; solos de textura argilosa ou muito	LATOSSOLO AMARELO e LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial de textura arenosa; LATOSSOLO BRUNO; NITOSSOLO VERMELHO; NEOSSOLO QUARTZARÊNICO;

	argilosa desde que a estrutura proporcione boa macroporosidade em todo o perfil; solos com argila de atividade baixa (Tb) e minerais de argila 1:1; a textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser arenosa/arenosa, arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa e argilosa/muito argilosa	ARGISSOLO VERMELHO ou VERMELHO AMARELO de textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa que não apresentam mudança textural abrupta.
C	Solos profundos (100 a 200 cm) ou pouco profundos (50 a 100 cm); solos com baixa taxa de infiltração e baixa resistência e tolerância à erosão; são solos com gradiente textural maior que 1,50 e comumente apresentam mudança textural abrupta; solos associados a argila de atividade baixa (Tb). A textura nos horizontes superficial e subsuperficial pode ser arenosa/média e média/argilosa, apresentando mudança textural abrupta; ou ainda, arenosa/argilosa e arenosa/muito argilosa.	ARGISSOLOS pouco profundos, mas não apresentando mudança textural abrupta ou ARGISSOLO VERMELHO, ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos profundos e apresentando mudança textural abrupta; CAMBISSOLO de textura média e CAMBISSOLO HÁPLICO ou HÚMICO, mas com características físicas semelhantes aos LATOSSOLOS (latossólico); ESPODOSSOLO FERROCÁRBICO; NEOSSOLO FLÚVICO.
D	Solos com taxa de infiltração muito baixa, oferecendo pouquíssima resistência e tolerância à erosão; solos rasos (prof. < 50 cm); solos pouco profundos associados à mudança textural abrupta ou solos profundos apresentando mudança textural abrupta, aliada à argila de alta atividade (Ta) e minerais de argila 2:1; solos argilosos associados à argila de atividade alta (Ta); solos orgânicos.	NEOSSOLO LITÓLICO; ORGANOSSOLO; GLEISSOLO; CHERNOSSOLO; PLANOSSOLO; VERTISSOLO; ALISSOLO; LUSSISSLIO; PLINTOSSOLO; SOLOS DE MANGUE; AFLORAMENTOS DE ROCHA; Demais CAMBISSOLOS que não se enquadram no Grupo C; ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos pouco profundos e associados à mudança textural abrupta.

Fonte: Sartori (2004)

A impermeabilização do solo devido à conversão de habitats naturais em áreas urbanas ou agrícolas tem um impacto significativo no escoamento superficial. Isso pode aumentar consideravelmente os níveis de vazão nos cursos d'água, tornando o controle do escoamento um fator importante na gestão de bacias hidrográficas

5.7.3 Chuva-Vazão

Para avaliar o dimensionamento de um canal, verificar o desempenho de estruturas hidráulicas ou estimar a área inundada em um evento chuvoso, é crucial considerar o volume de precipitação que incide na bacia de contribuição a montante do ponto de estudo. No entanto, nem toda a chuva que cai sobre a bacia hidrográfica atinge o seu ponto de saída. Isso se deve a diversos fatores, como interceptação pela vegetação, retenção no solo, infiltração, escoamento superficial, evapotranspiração e armazenamento temporário em reservatórios naturais.

Além disso, a distribuição temporal da chuva desempenha um papel fundamental na determinação das vazões resultantes do escoamento superficial. A variação no tempo e na intensidade da chuva influencia diretamente a quantidade e a velocidade com que a água escoa pela bacia, afetando o comportamento hidrológico do sistema. Para converter os dados de precipitação em vazões, são utilizados métodos conhecidos como "chuva-vazão". Esses métodos estimam a vazão que ocorre em uma seção de controle, decorrente de uma chuva em sua bacia de contribuição. Assim, ao determinar uma vazão em relação a uma precipitação associada a um determinado tempo de retorno, os métodos chuva-vazão tornam-se essenciais para o dimensionamento e verificação de estruturas hidráulicas.

Existe a possibilidade em alguns casos de trabalhar com séries históricas de vazão, contudo as séries de precipitação costumam representar períodos mais longos e conforme a bacia hidrográfica sofre alterações, as séries de vazão deixam de ser estacionárias. Já o modelo chuva-vazão contempla as mudanças de cenários na bacia ao longo do tempo. (TUCCI, 2005).

Assim, os modelos chuva-vazão são muito úteis graças, entre outras coisas, a sua flexibilidade em prever comportamentos futuros ocasionados por alterações de ocupação e pela carência de dados fluirométricos, principalmente em pequenas bacias que geralmente recebem menos investimentos (MENDONÇA, 2021).

5.7.4 O Hidrograma Unitário

Uma bacia hidrográfica pode ser entendida como sistema que transforma a precipitação em vazão, porém durante essa transformação os processos de infiltração, retenção e evapotranspiração podem alterar o volume do escoamento superficial final. Além disso, o curso tomado pelo escoamento pode modificar sua velocidade, retardando ou adiantando o hidrograma (CHRISTOFOLETTI, 1994).

O Hidrograma Unitário (HU) é um método que também foi desenvolvido pelo *Soil Conservation Service* (SCS). O método do hidrograma unitário parte da hipótese que existe uma relação linear entre a chuva efetiva e o hidrograma gerado, desta forma chuvas de mesma intensidade e duração tendem a gerar resposta de vazão semelhantes, ao passo que chuvas mais intensas tendem a gerar mais escoamento e hidrogramas mais pronunciados, enquanto chuvas menos intensas tendem a gerar hidrogramas mais atenuados e com vazão de pico menores (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

O método do hidrograma unitário ainda se baseia nos princípios da proporcionalidade, em que o volume de escoamento superficial está diretamente ligado à intensidade da chuva, e na superposição, que envolve a combinação de hidrogramas resultantes de chuvas individuais para gerar um hidrograma de escoamento superficial de múltiplas chuvas efetivas consecutivas.

Geralmente, a aplicação do método do hidrograma unitário é facilitada dentro de um modelo hidrológico ou pode ser executada em planilhas de cálculo (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). Esse método é útil para representar a resposta do escoamento superficial a eventos de chuva, permitindo estimativas de vazão em diferentes condições hidrológicas. Apesar da linearidade o HU tende a gerar um escoamento mais rápido em eventos maiores, entretanto o hidrograma unitário sintético base de muitos modelos hidrológicos vem demonstrando bons resultados para calcular a vazão máxima de projeto, especialmente para modelagem concentrada (STEINMETZ, 2019).

5.8 MODELAGEM HIDRÁULICA

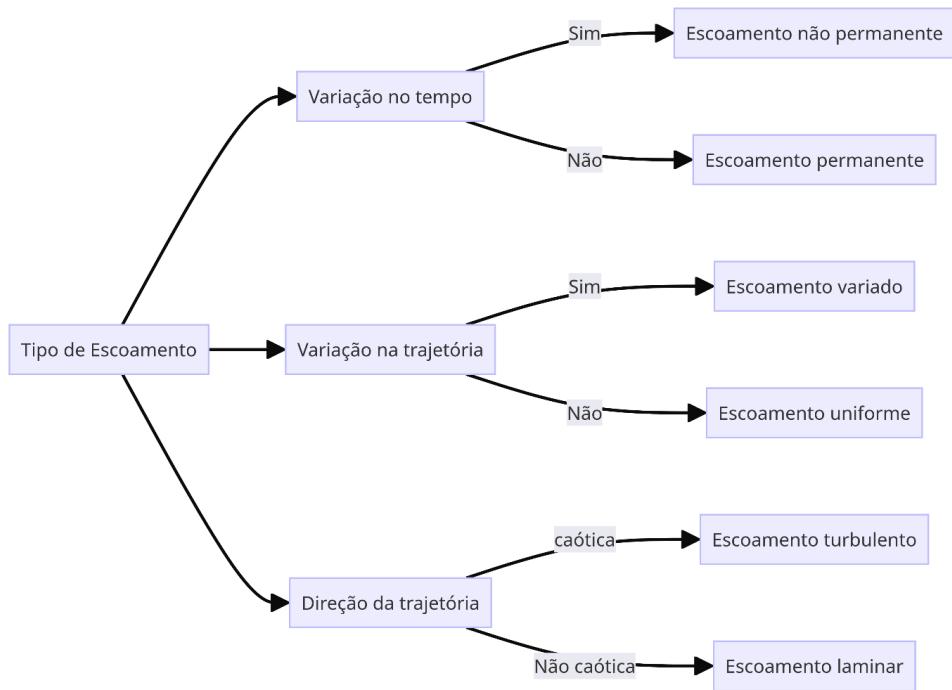
5.8.1 Escoamento

A vazão em um curso d'água resulta da interação entre a precipitação e a bacia hidrográfica. Essa interação é influenciada pelas características da bacia e pelos fenômenos que nela ocorrem.

Durante chuvas intensas, a parte do volume de precipitação que não consegue infiltrar-se no solo segue em direção aos cursos d'água, configurando o fenômeno conhecido como escoamento superficial. Quando esses escoamentos superficiais das diferentes sub-bacias se unem em um fluxo maior, ocorre a sobrecarga dos cursos de água. Isso resulta na formação de picos de vazão, que são responsáveis por eventos como enchentes, enxurradas e inundações.

Os fluxos de fluidos em um conduto podem ser categorizados de acordo com diversos critérios, conforme representado na Figura 5. Quanto à variação temporal, eles podem ser classificados como permanentes, quando suas características hidráulicas permanecem constantes ao longo do tempo e as variações sazonais do escoamento não são relevantes, ou não permanentes, quando tais variações são significativas. Em relação à variação na trajetória (seções transversais e velocidade média), são distinguidos entre fluxos uniformes, quando não há variações, e variados, quando existem variações significativas (KANASHIRO, 2011).

Figura 5 — Tipos de escoamento.



Fonte: adaptado de (KANASHIRO, 2011).

Adicionalmente, quanto à direção da trajetória, os fluxos podem ser categorizados como laminar quando o número de Reynolds é inferior a 2000, turbulento quando o número de Reynolds é superior a 2400 e, para valores entre 2000 e 2400, ocorre o que é chamado de escoamento de transição. Essas diferentes classificações oferecem uma abordagem abrangente para compreender os movimentos e comportamentos dos fluidos em sistemas de condução, levando em consideração as variações temporais, na trajetória e na direção do fluxo (PORTO, 2001).

5.8.2 Modelo HEC-RAS

O *Hydrologic Engineering Centers River Analysis System* (HEC-RAS) é um software desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (*US Army Corps of Engineers*) para modelar canais abertos naturais ou artificiais em regime permanente e não permanente. Existem diversas aplicações para o HEC-RAS, tais como estudos de inundação, de ruptura de barragens, transporte de

sedimento e análise de qualidade da água, além de delinear planícies de inundação e modelar estruturas hidráulicas, como pontes e bueiros (USACE, 2010).

O software parte dos princípios da continuidade e de conservação de energia e realiza a simulação hidráulica por meio da solução das equações de Saint Venant (TENG, 2019). Os principais dados de entrada para a construção do modelo são: MDE com topografia das áreas de várzea e topobatimetria do canal, valores do coeficiente (n) de Manning para o canal e planície de inundação e condições de contorno a montante e a jusante, podendo ser a vazão (valores fixos para o escoamento permanente e hidrogramas para o não permanente), curva chave, hidrograma de nível ou declividade do canal.

Para modelos hidrodinâmicos é comum que seja realizado o processo de integração de dois ou mais modelos independentes para criar um sistema mais abrangente e complexo, comumente chamado de acoplamento de modelos, nessa situação geralmente os dados de saída de um primeiro modelo são utilizados como condição de entrada para um segundo. Um exemplo de acoplamento de modelos é a utilização dos hidrogramas unitários gerados no HEC-HMS como condição de contorno na modelagem hidráulica, executada no HEC-RAS para a avaliação da região inundada em um evento conhecido (USACE, 2010).

Os modelos hidráulicos constituem uma representação dos processos hidráulicos que acontecem durante eventos de inundação (COOK, 2008). Essa técnica é aplicável em diferentes dimensões, como modelos 1D, 2D e 3D. O HEC-RAS, por exemplo, é capaz de realizar modelagens em 1D, 2D e combinações de 1D e 2D (BRUNNER, 2020).

Os modelos de inundação unidimensionais simulam fluxos de direção predominantemente longitudinal, como rios e canais confinados. O modelo de uma dimensão é adequado para o estudo de escoamento abaixo da cota de inundação em canais abertos, a restrição da água às margens do canal atribui a características unidimensional ao escoamento (SURWASE *et al.*, 2019). Considerando que quando um curso de água transborda e atinge a planície no de inundação existe a possibilidade da água se mover em, ao menos, duas direções (TENG, 2019).

Os modelos 1D exigem menos recursos de processamento computacional (DIMITRIADIS, 2016), mas estão sujeitos a limitações de modelagem, como a incapacidade de simular a difusão lateral das ondas de inundação, a subjetividade da localização, orientação da seção transversal e a discretização da topografia como seções transversais em vez de uma superfície contínua (DASALLAS; KIM; AN, 2019).

Dentre as vantagens do modelo um 1D em relação ao modelo 2D, estão a exigência de menos dados, menor tempo de cálculo, maior eficiência em representar o fluxo no canal, entretanto o modelo 2D pode ser mais amigável ao usuário (BRATTON, 2017).

Os modelos 2D são utilizados para simular o fluxo da planície de inundação, a fim de visualizar a extensão das cheias que os modelos 1D não conseguem fornecer. Os modelos bidimensionais simulam inundações com o pressuposto de que a profundidade da água na direção vertical pode ser desprezada, em comparação com as outras duas dimensões (DASALLAS; KIM; AN, 2019).

Segundo Bratton 2017, o modelo 1D apesar de apresentar em seu estudo um tempo de execução 96% mais rápido que o modelo 2D, o modelo 1D exigia valores n de Manning 25-34% maiores do que o 2D modelo para obter os mesmos resultados de calibração. Isto ocorre porque a rugosidade no modelo 1D é usada para contabilizar a maioria das perdas hidráulicas, enquanto no modelo 2D o cálculo de perdas é mais sensível. O autor ainda destaca que as elevações da superfície da água do modelo 1D eram inferiores aos do modelo 2D em mais de 60 centímetros em alguns locais.

Uma possível causa para a discrepância entre os resultados dos modelos é que o 1D reconhece a geometria da planície de inundação apenas em alguns locais isolados ao longo do canal. Isso se dá durante a modelagem em 1D, quando são definidas seções transversais do canal principal, através das quais o software irá realizar os cálculos que envolvem a geometria do canal. Desta forma, o software reconhece a geometria da planície de inundação através das seções transversais posicionadas em alguns locais isolados ao longo do canal, assim, com a redução do intervalo entre as seções transversais, espera-se que os resultados sejam mais precisos (COOK, 2008). Além disso, o espaçamento entre seções transversais consecutivas pode gerar problemas de instabilidade (SHARKEY, 2014).

Diferentemente o modelo 2D considera a paisagem como uma superfície constante (KALRA *et al.*, 2021), com células de grade significativamente menores do que a área de margem da seção transversal 1D, permitindo cálculos mais precisos e detalhados no modelo 2D (BRATTON, 2017).

Em muitos casos, quando o padrão de fluxo é uniforme e unidirecional, o modelo 1D é considerado satisfatório o suficiente para computar as alturas de enchentes e criar a área de inundação (BÜCHELE *et al.*, 2006). No entanto, os modelos 2D são mais detalhados e mais confiáveis para simulações de fluxo complexas (DASALLAS; KIM; AN, 2019).

Contudo a escolha do modelo mais apropriado para cada situação deve avaliar as condições quanto a área de estudo, dados disponíveis, projeto cronograma, orçamento, requisitos regulatórios e nível de experiência dos modeladores (BRATTON, 2017).

6 METODOLOGIA

Nesta seção é detalhada a metodologia empregada na pesquisa. Inicialmente é realizada a delimitação e descrição da área de estudo, com informações sobre localização, geomorfologia e clima da BHISF. Em seguida, é feito o delineamento do estudo, abordando as condicionantes de cada cenário proposto para simulação.

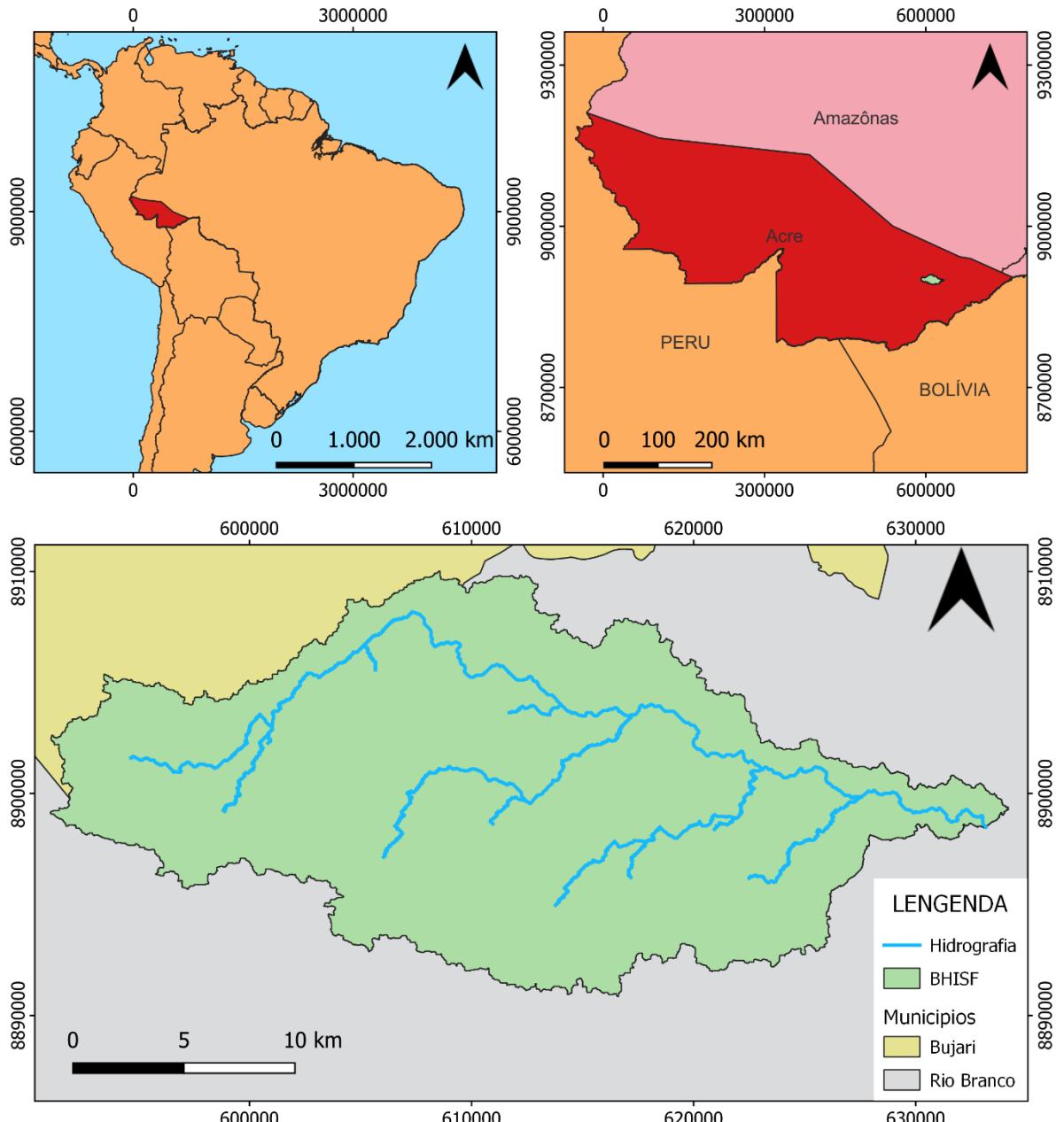
Posteriormente são discutidos os critérios adotados para a obtenção dos dados de entrada do modelo, como chuva de projeto, tempo de concentração e modelo digital de terreno (MDT). Por último, são descritos os métodos adotados e os cálculos dos parâmetros necessários para a construção do modelo hidrológico e hidráulico da BHISF.

6.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo deste trabalho, Figura 6, é a Bacia Hidrográfica do Igarapé São Francisco (BHISF), situada na mesorregião do Vale do Acre, que faz parte da rede de drenagem do estado do Acre e está inserida no território dos municípios de Bujari e Rio Branco. A nascente do Igarapé São Francisco está localizada próxima ao limite entre os dois municípios e a foz no Rio Acre, na área urbana de Rio Branco.

O Igarapé São Francisco é considerado um dos principais afluentes do Rio Acre e o segundo maior coletor de macrodrenagem urbana da cidade de Rio Branco, ficando atrás apenas do próprio Rio Acre, o que caracteriza sua extrema relevância no ambiente urbano de Rio Branco. O Igarapé São Francisco cruza o 1º Distrito de Rio Branco (parte da cidade à margem esquerda do Rio Acre), no sentido noroeste-sudeste, sendo responsável por cerca de 50% da drenagem natural da capital acreana. Os principais tributários do Igarapé São Francisco são os Igarapés: Senzala, Onça, Saituba, Paxiúba, Dias Martins, Batista e Fundo (HID, 2000).

Figura 6 — Mapa de localização da Bacia Hidrográfica Igarapé São Francisco (BHISF).

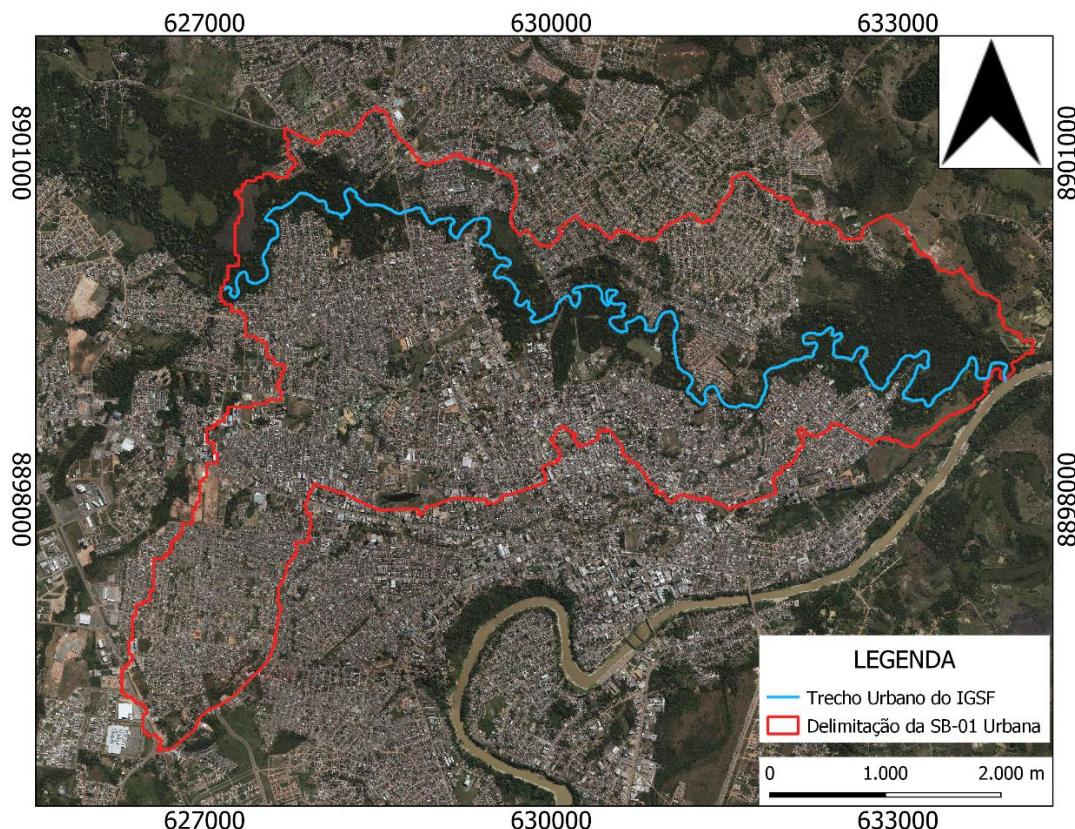


Fonte: produzido pelo autor usando a Base Cartográfica do ZEE-AC (2012)

A quase totalidade da BHISF está localizada no Município de Rio Branco, maior cidade e capital do Estado do Acre. A cidade está posicionada em torno do sistema de referência de coordenadas SIRGAS 2000 / UTM zone 19S (EPSG:31967). De acordo com o último censo realizado pelo IBGE em 2022, a cidade possui uma população residente de 364.756 habitantes, sendo a 7^a cidade mais populosa da região norte e 70^a mais populosa do Brasil (IBGE, 2023). A Figura 7 ilustra a localização da área urbana de Rio Branco, destacando a localização da SB-01 e o

trecho do Igarapé São Francisco mais urbanizado, onde ocorrem os maiores prejuízos causados pelas inundações.

Figura 7 — Mapa de Sub-Bacia Urbana na Cidade de Rio Branco (SB-01).



Fonte: elaboração própria.

No âmbito da geomorfologia, a bacia do Igarapé São Francisco na sua maioria é ocupada pela Depressão Rio Branco (75,6%), sendo seguida pela Depressão do Rio Branco (24,2%) e apenas 0,2% ocupada pela Planície Amazônica. Quanto a geologia 99,8% da BHISF é ocupada pela Formação Solimões Superior e apenas 0,2% por Aluviões Holocênicos (NASCIMENTO, 2013).

Em 2016, um diagnóstico produzido pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Rio Branco (SEMEI) em parceria com a Universidade Federal do Acre (UFAC), mostrou que a bacia do São Francisco sofre contaminação por sub-bacias poluidoras e apresenta 56% de sua área desmatada ou muito alterada, seja devido exploração pecuária na área rural ou, ampliação da malha viária na parte urbana, quase não se observou vegetação ciliar as margens do igarapé. Apenas é possível

encontrar vegetação nativa na área localizada entre os limitas dos municípios de Rio Branco e Bujari (ALVES, 2014).

O estado do Acre possuí clima equatorial, caracterizado pela alta umidade relativa do ar e elevadas temperaturas durante o ano todo. Culturalmente a população distingue o ano em dois períodos climáticos: o verão amazônico, época menos chuvosa, entre os meses de junho e setembro; e o inverno amazônico, período que compreende os meses de outubro a abril, caracterizado por chuvas intensas e constantes. A precipitação pluvial média anual gira em torno de 2.000 mm (ACRE, 2010).

6.2 PRÉ-PROCESSAMENTO

6.2.1 O modelo digital de terreno (MDT)

Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizados dois MDEs diferentes, um com resolução mais grosseira, para a modelagem hidrológica da bacia de contribuição e outro, mais preciso, para a modelagem hidráulica do trecho urbano do Igarapé São Francisco.

Os MDEs tornaram-se dados essenciais para pesquisas em diversas áreas (ARABELOS, 2000). O *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), apesar de limitações como a presença de vazios causados pelo sombreamento do radar e a falta de cobertura em altas latitudes, é provavelmente o MDE mais bem-sucedido e amplamente utilizado até os últimos anos (GROHMANN, 2018).

No entanto, em 2010 um projeto em parceria entre o Centro Aeroespacial Alemão (DLR) e a Airbus Defence and Space deu início a missão TanDEM-X, com o lançamento de dois satélites (TerraSAR-X e TanDEM-X), que em órbitas próximas, numa formação hélice fechada a cerca de 514 km de altitude em média do equador, capturam imagens de radar de alta resolução espacial da superfície da

Terra (BACHMANN *et al.*, 2021). O produto resultante marcou um significativo avanço na modelagem, proporcionando excelentes resultados (RIZZOLI *et al.*, 2017).

O TanDEM-X DEM foi editado pela primeira vez pela *Airbus Defence and Space* e disponibilizado comercialmente como WorldDEM™ (COLLINS *et al.*, 2015). Recentemente, essa versão comercial foi cuidadosamente editada para dar origem ao *Copernicus DEM* (COP-30) (PURINTON; BOOKHAGEN, 2021), produzido em três diferentes versões: EEA-10 (0,4 segundos de arco), GLO-30 (1,0 segundos de arco) e GLO-90 (3,0 segundos de arco), sendo que os dois últimos disponibilizados gratuitamente (MAREŠOVÁ *et al.*, 2021).

O modelo digital de elevação empregado na modelagem hidrológica foi obtido a partir de imagens do Modelo Digital de Superfície (MDS) COP-30 de 1,0 segundos de arco (COP-30), que representa a superfície da Terra, incluindo edifícios, infraestruturas e vegetação (AIRBUS, 2020).

O MDE COP-30 pode ser obtido gratuitamente através do repositório de dados PANDA da ESA ou ainda pelo repositório OpenTopography (CLEMOM *et al.*, 2021). Pesquisas recentes conduzidas em regiões com variadas condições climáticas e diferentes tipos de relevo destacam o COP-30 como sendo o MDE mais preciso e de maior qualidade para a representação da superfície topográfica entre outros tipos de MDEs disponíveis gratuitamente (MAREŠOVÁ *et al.*, 2021; CLEMOM *et al.*, 2021; ALVES; VALERIANO, 2023), e deve tornar-se o MDE preferido para análise topográfica em áreas sem cobertura suficiente de MDEs locais de maior qualidade (PURINTON; BOOKHAGEN, 2021).

No Brasil vários estudos atestam a qualidade das imagens do Copernicus 30. Segundo Clemom *et al.* (2021) o MDE COP-30 apresentou para o Estado de Goiás e Distrito Federal raiz de erro quadrático médio de 1,98 m, indicando uma maior acurácia em relação a outros MDEs globais gratuitos.

Para a região de abrangência da Formação Tupanciretã, norte do Estado do Rio Grande do Sul (RS) o COP-30 demonstrou ser o MDE de melhor acurácia vertical para região (REIS; OLIVEIRA; ABRADÉ-FILHO, 2023). O MDE COP-30 é sobretudo eficiente na representação de terrenos pouco íngremes, como é o caso da região amazônica (ALVES; VALERIANO, 2023).

No que tange a simulação da dinâmica do nível da água, a qualidade dos resultados da modelagem hidráulica depende da precisão dos dados topográficos. Portanto, as resoluções do MDE e da malha são os fatores mais importantes para o mapeamento da extensão da inundação (ALIPOUR; JAFARZADEGAN; MORADKHANI, 2022). A avaliação da área de inundação tende a ser superestimada com o uso de MDE de resolução superior a 10 m (GHIRIME; SHARMA, 2021).

O Modelo Digital de Terreno (MDT) adota uma abordagem mais criteriosa em comparação com o MDE, representa a superfície terrestre desconsiderando elementos artificiais, como edifícios e pontes, concentrando-se na topografia real do terreno.

O MDT utilizado para a modelagem hidráulica do trecho urbano do Igarapé São Francisco foi fornecido pela Prefeitura Municipal de Rio Branco e possui resolução espacial de 1 metro por pixel.

6.2.2 Delimitação das Sub-Bacias no HEC-HMS

A modelagem hidrológica foi restrita a uma parcela da BHISF, compreendendo duas sub-bacias de contribuição. A primeira bacia de contribuição inclui desde a cabeceira da BHISF até o encontro do ISF com o Igarapé Dias Martins, em Rio Branco no Bairro Conquista, coordenadas: latitude 9°57'4.35"S; longitude 67°50'21.64"O. A segunda bacia de contribuição é a Bacia Hidrográfica do Igarapé Fundo (BHIF), totalmente integrada à zona urbana de Rio Branco, tem seu exutório no ISF, próximo à Procuradoria Geral do Estado do Acre (PGE). Para construção do modelo o exutório que dará origem ao hidrograma de saída foi posicionado nas coordenadas latitude 9°57'12.03"S; longitude 67°49'14.62"O, entre as Avenidas Antônio da Rocha Viana e Getúlio Vargas.

Para a construção do modelo foi utilizado o software HEC-HMS versão 4.10. O programa agrupa várias metodologias de processos hidrológicos que podem ser simulados em bacias hidrográficas. Os dados de entrada necessários para criação do

modelo foram: o modelo digital de terreno, os métodos de cálculo dos processos hidrológicos e a chuva de projeto (USACE, 2013).

O processo de delimitação da sub-bacia de contribuição teve início no software Qgis versão 3.22.8, por meio do plugin *OpenTopography* foi feito o download do MDE COP-30. O MDE foi recortado em formato retangular de dimensões ligeiramente maiores que a área de estudo.

A construção do modelo hidrológico dentro do ambiente HEC-HMS iniciou com a inserção dos dados geoespaciais de topografia, o MDE foi pré processado para a determinação da direção de drenagem, do segmento de fluxo e da área de drenagem.

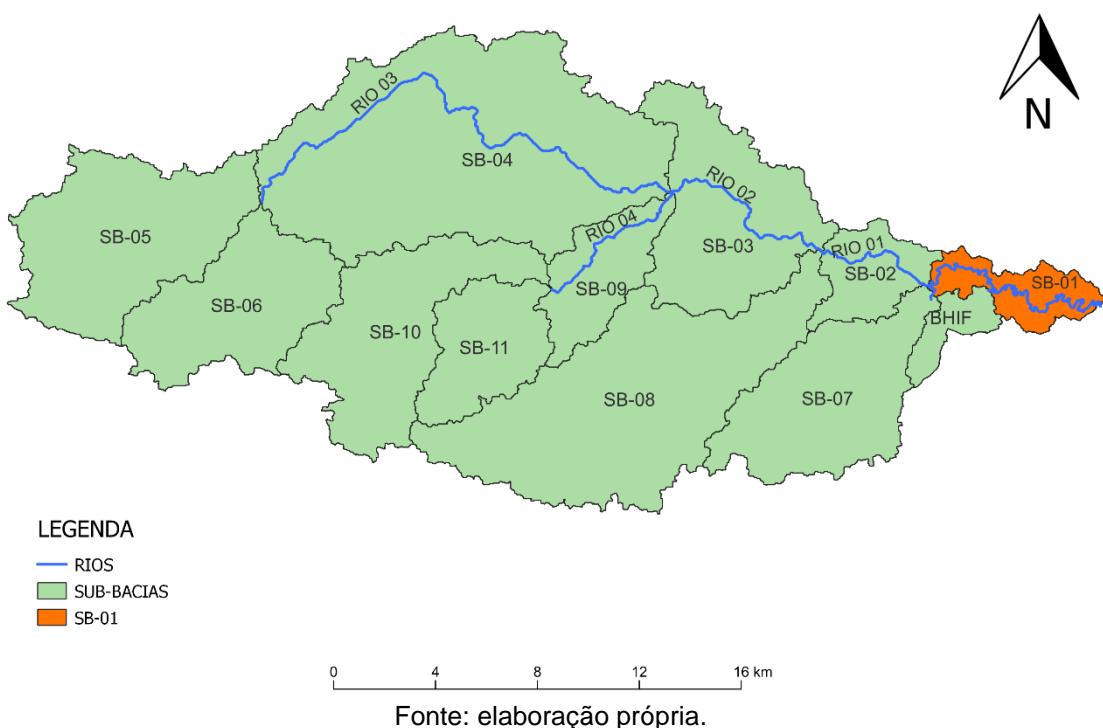
A delimitação automática da sub-bacia e dos elementos que compõem o modelo foi realizada a partir da definição do exutório na junção entre os igarapés São Francisco e Dias Martins. Vale destacar que esse ponto está localizado a montante de onde foram observados os principais pontos de inundação durante a cheia histórica de março de 2023.

A bacia de contribuição principal foi fracionada em sub-bacias, tomando como critério o agrupamento de áreas que compartilham parâmetros e características semelhantes, a fim de obter um modelo distribuído, mais preciso. Mas que, por outro lado, não acrescente a modelagem uma complexidade desnecessária.

Durante a modelagem hidrológica percebeu-se que uma área de contribuição relevante não estava tendo sua vazão computada, desta forma essas áreas foram simuladas a parte e a principal delas corresponde a BHIF. Sendo assim, os mesmos procedimento executados para Bacia de Contribuição Principal foram reproduzidos para a BHIF.

A BHISF foi delimitada e subdividida em 11 sub-bacias, a SB-01, onde fica localizada na área urbana de Rio Branco foi descartada e parte dela foi considerada na simulação da BHIF, conforme Figura 8.

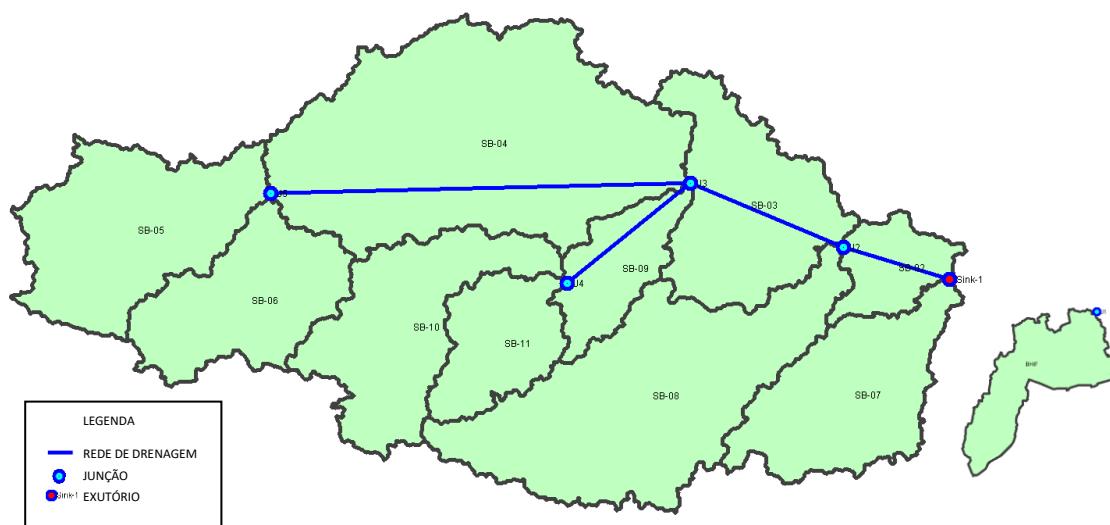
Figura 8 — Delimitação da BHISF e divisão em sub-bacias.



Fonte: elaboração própria.

Assim a partir dessa configuração foram estabelecidas 2 bacias de contribuição, a primeira, Bacia de Contribuição Principal, engloba as sub-bacias de 02 a 11, 4 trechos de rios, 4 junções e 1 exutório, a segunda é na BHIF e foi modelada concentrada, conforme Figura 9.

Figura 9 — Esquema de modelagem utilizado no HEC-HMS



Fonte: produzido pelo autor.

6.2.3 A chuva de projeto

No escopo da análise hidrológico da bacia hidrográfica é fundamental encontrar uma forma de representação simplificada que relate a intensidade, duração e frequência da precipitação, ou seja, a distribuição do volume precipitado ao longo do tempo de duração da chuva, dado certo tempo de retorno. A falta de séries históricas de precipitação distribuída numa escala temporal com precisão suficiente para ilustrar o comportamento da chuva durante seu tempo de duração, fez necessário lançar mão de métodos estatísticos para construção de um hietograma sintético, no caso a curva de intensidade, duração e frequência (IDF), elaboradas através de registros históricos de precipitação processados estatisticamente.

Para a obtenção da chuva de projeto foi utilizada a IDF proposta por Fragoso (2004):

$$i = \frac{a \cdot TR^b}{(T_c + c)^d} = \frac{1419,345 \cdot TR^{0,162}}{(T_c + 18)^{0,795}} \quad (10)$$

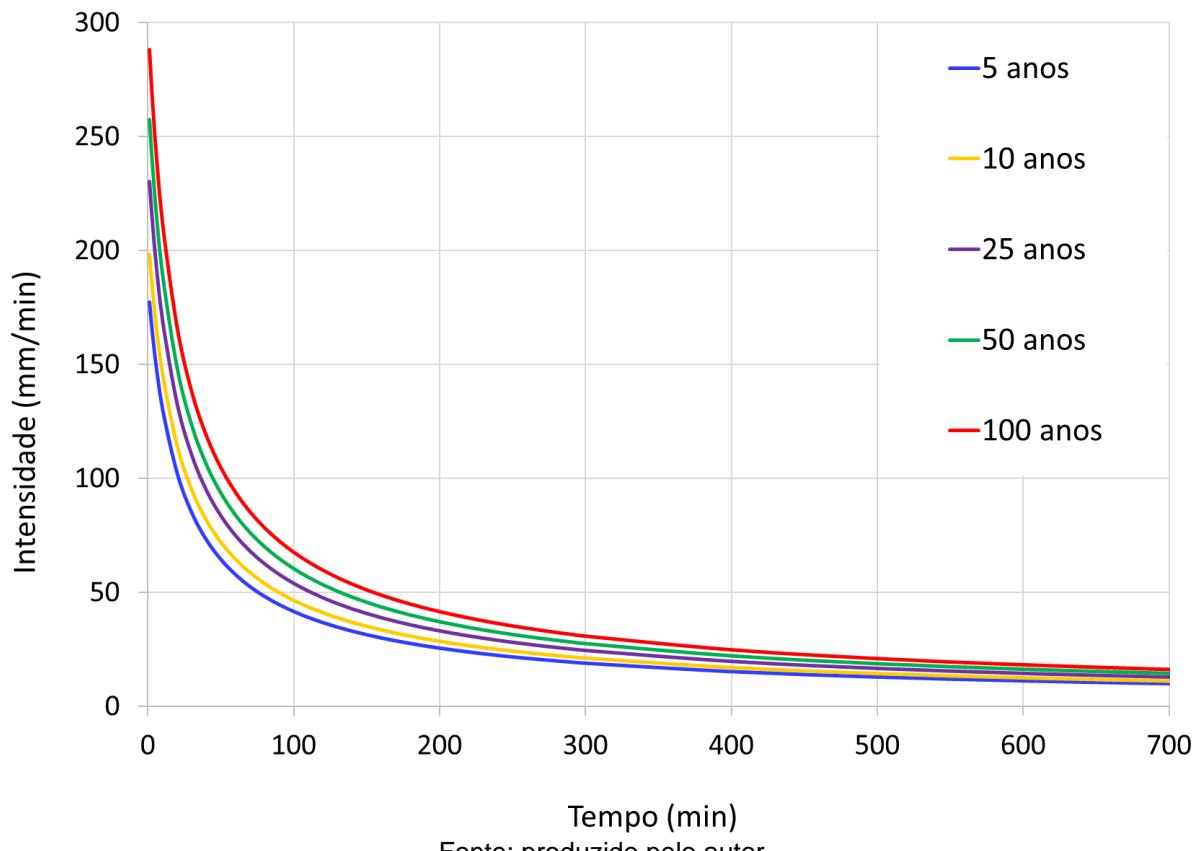
Onde: i é a intensidade da precipitação em mm/h, a , b , c , d são coeficiente da curva obtidos estatisticamente, TR – tempo de retorno em anos e T_c tempo de duração da chuva em minutos.

Ainda na fase de pré-processamento a precipitação obtida com a IDF (Equação 10) foi distribuída ao longo do tempo de duração da chuva e projeto. Para essa finalidade, costumam-se utilizar principalmente dois métodos: modelos dos blocos alternados (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013) e Método de Huff (HUFF, 1967). No método dos blocos alternados o pico de precipitação é geralmente concentrado no primeiro terço ou na metade do tempo de duração da precipitação, enquanto no método de Huff o pico da precipitação é determinado em função do tempo de duração da chuva de projeto.

O momento em que haverá a maior incidência do volume precipitação durante o evento, tem impacto crucial na simulação de área alagada, uma vez que a abstração

inicial exerce um impacto significativo nos primeiros minutos de precipitação, período que em que há maior infiltração de água no solo.

Figura 10 — Gráfico da relação IDF para os tempos de retorno de 5, 10 25, 50 e 100 anos.



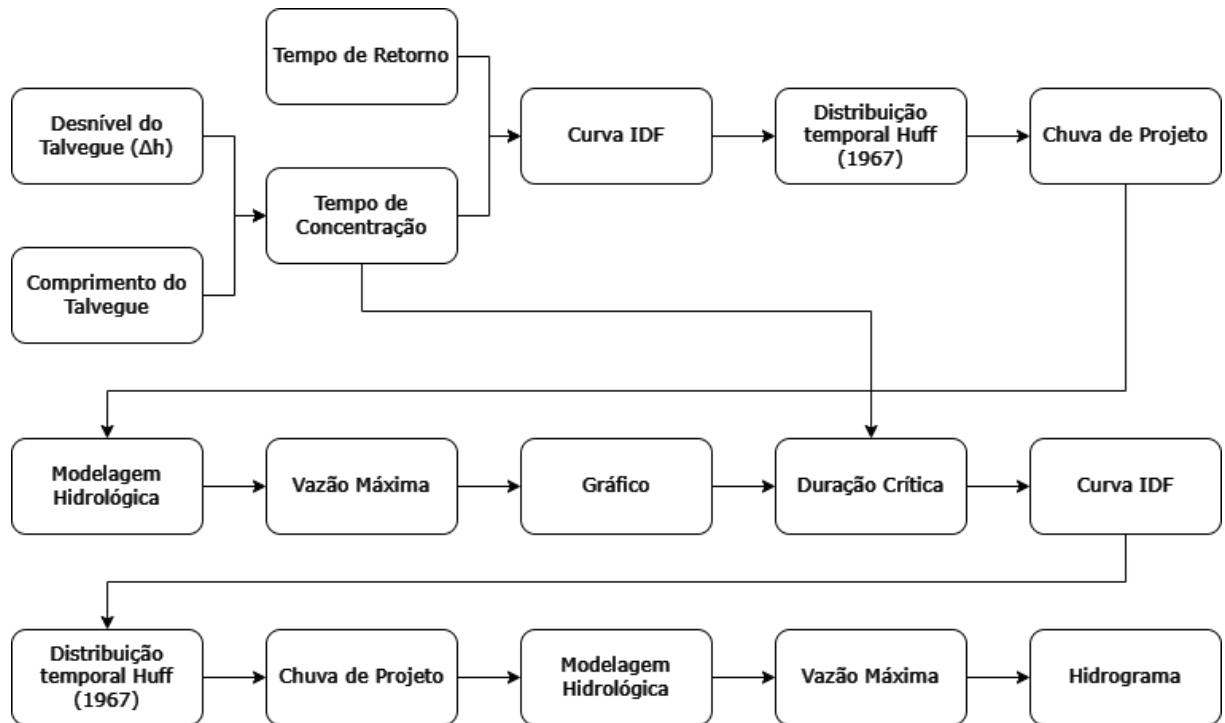
Fonte: produzido pelo autor

Abreu, Sobrinha e Brandão (2017) ao comparar os métodos de Huff e dos blocos alternados encontraram diferenças de até 46% na vazão de pico e 57% nas áreas da mancha de inundação da mesma região, o que resultou uma discrepância de 1,5 m na cota de inundação. Os autores ainda destacam que o método de Huff se mostrou menos arbitrário, porque considera o tempo de concentração e características locais. Em virtude disso, foi adotado nessa pesquisa o método de Huff para desagregar a precipitação.

A duração da chuva de projeto utilizada na distribuição temporal foi calculada graficamente de acordo com Innocente *et al.* (2018), de modo a obter a duração crítica da chuva, isto é, a chuva para a qual o modelo retornará a maior vazão de pico. A duração da chuva encontrada foi de 20 horas, tempo similar ao tempo de

concentração da BHISF. A Figura 11 esboça o esquema do método utilizado para a determinação do tempo de duração crítica da chuva.

Figura 11 — Esquema para determinação da duração crítica da chuva de projeto.



Fonte: produzido pelo autor

6.3 A CRIAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO

Durante a modelagem hidrológica foram necessárias quatro decisões metodológicas para a criação dos hidrogramas de cheia, são elas: a escolha dos processos de perda, transformação, vazão de base e escoamento de canais. Nas próximas sessões essas decisões serão minuciosamente narradas e fundamentadas.

6.3.1 Método de Perdas: Método *Curve Number*

Na determinação da precipitação efetiva, aplicou-se a metodologia *Curve Number* (CN) descrita na sessão 5.7.2. O índice CN está relacionado ao tipo de solo, a forma de uso e ocupação do solo e às condições de umidade antecedentes. CN é

adimensional e varia entre 0 e 100, sendo que maiores valores acarretam maior escoamento superficial.

O tipo de solo e o uso e ocupação da BHISF foram mapeados utilizando os dados provenientes do Zoneamento Econômico-Ecológico (ZEE), um instrumento de organização territorial que tem a finalidade de otimizar o uso do solo, identificar áreas propícias para atividades econômicas específicas e garantir a conservação de ecossistemas sensíveis (BRASIL, 2002).

A classificação dos grupos hidrológicos dos solos guiou-se pelas orientações da Tabela 1, definidas por Sartori (2004). Para auxiliar na classificação quanto ao grupo hidrológico mais pertinente para cada tipo de solo presente na BHISF foi utilizada a “Caracterização e classificação dos solos do Pólo Acre I. Área de Rio Branco, Estado do Acre” de Rodrigues *et al.* (2003).

Como as condições de uso e ocupação do solo não são homogêneas em todas as bacias, possivelmente haverá valores de CN diferentes em regiões distintas de uma mesma bacia hidrográfica. Os valores de CN espacializados para a BHISF foram determinados por meio dos dados disponíveis na plataforma da Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA), nessa base de dados é possível encontrar um cartograma com estratificações do território brasileiro indicando áreas agrupadas pelo mesmo valor médio de CN.

O cartograma disponibilizado pela ANA foi obtido atribuindo as classes hidrológicas indicadas por Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005) aos solos brasileiros em escala 1:250.000. Em seguida, essas classes hidrológicas foram cruzadas com a grade de uso do solo e ocupação da terra do IBGE, considerando uma escala de 1 km x 1 km (escala 1:250.000). Posteriormente, efetuou-se um terceiro cruzamento desses dados com a Base Hidrográfica Ottocodificada (BHO) multiescalas da ANA.

Por questão de praticidade durante a modelagem hidrológica, foi adotado o modelo distribuído em sub-bacias. Desta forma, é atribuído um valor de CN a cada sub-bacia através da sua sobreposição ao cartograma da ANA no software Qgis, assim foi possível identificar o enquadramento das sub-bacias dentro das áreas com

CN definido. As sub-bacias que ocupam mais de uma faixa de CN com áreas consideráveis (parte menor igual a pelo menos 10% da parte maior) tiveram o valor de CN calculados por meio da média ponderada pela área.

Para se empregar o método SCS-CN também foi calculado a Infiltração Potencial Máxima (capacidade máxima do solo para absorver água, sem que ocorra escoamento superficial) e a Abstração Inicial (parcela específica da precipitação total que ocorre antes do início do escoamento superficial na seção de controle).

Os valores obtidos de CN, Infiltração Potencial Máxima e Abstração Inicial foram inseridos no modelo como dados de entrada para cada sub-bacia.

6.3.2 Método de Transformação: Hidrograma Unitário

O módulo de transformação foi configurado de acordo com Hidrograma Unitário (HU) do SCS, as variáveis de entrada são os tempos de concentração e retardo (*lag time*) conforme descrito a seguir.

6.3.2.1 Tempo de Concentração

A área da BHISF é predominantemente ocupada por floresta, pastagem e solo exposto (ANDREDE *et al.*, 2022). Sendo assim, para o cálculo do tempo de concentração foi adotada a equação de Kirpich, desenvolvida a partir de dados experimentais de bacias hidrográficas rurais norte-americanas.

$$T_c = 57 \left(\frac{L^3}{\Delta h} \right)^{0,385} \quad (11)$$

Onde T_c é o tempo de concentração, L é o comprimento do curso d'água principal da bacia e Δh é o desnível entre o início e o final do curso d'água principal.

Originalmente a equação foi desenvolvida para bacias hidrográficas rurais de até $0,45 \text{ km}^2$, no entanto, é uma das poucas fórmulas de tempo de concentração rurais

que apresentam bom resultados em área urbanizada, com erro médio bastante razoável para bacias entre 150 e 12.000 km², cerca de - 9% (SILVEIRA, 2005).

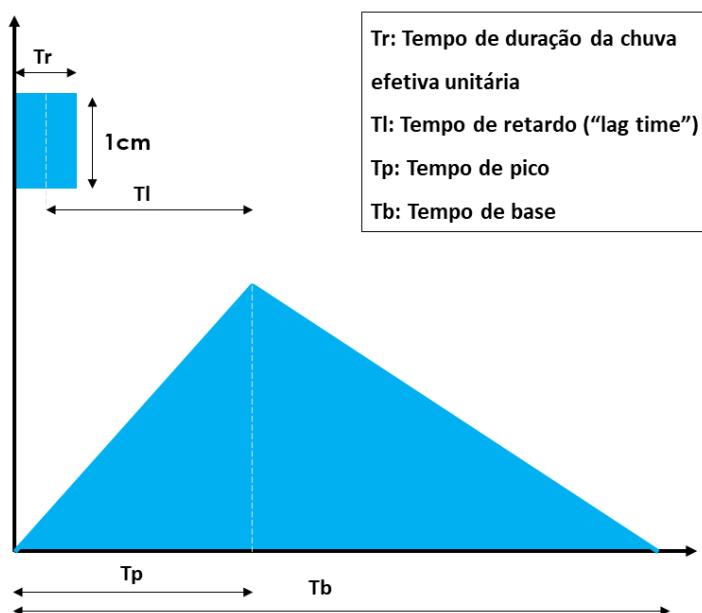
O tempo de concentração foi calculado para a BHISF em sua totalidade a fim de estabelecer um valor inicial a duração da chuva e para cada sub-bacia para ser utilizado como valor de entrada no modelo e variável independente no cálculo do *lag time*.

6.3.2.2 Tempo de Retardo

O tempo de retardo ou “lag time” é o tempo de atraso da vazão de pico em relação a ou centro da chuva, ou seja, o tempo medido em minutos após a metade da precipitação até que ocorra a vazão de pico.

O tempo de retardo corresponde a 60% do tempo de concentração. E pode ser medido pela distância gráfica no hidrograma entre o centro de massa da precipitação e o centro de gravidade do hidrograma Figura 12.

Figura 12 — Ilustração do hidrograma unitário e o *Lag Time*.



Fonte: (COSTA JUNIOR, 2022)

6.3.3 Escoamento de Base

Nos momentos de estiagem os rios geralmente apresentam um escoamento de base, uma vez que as oscilações de vazão são muito menores do que as observadas durante os períodos chuvosos. Nessa época, o escoamento é mantido principalmente pela água subterrânea dos aquíferos.

Ao adotar a curva de recessão para estimar o escoamento de base (*base flow*) é necessário a determinação do coeficiente de recessão. E a maioria dos métodos para obtenção coeficiente recessão demanda dados da série histórica de vazão do rio, ou pelo menos dados de vazão em dias consecutivos sem precipitação.

No Igarapé São Francisco não existem estações fluviométricas em operação. Sendo assim, para encontrar valores para o escoamento de base, buscou-se realizar medidas de vazão em dias consecutivos sem registro de precipitação, com o objetivo de aplicar o método de recessão. Entretanto o canal apresenta vazões muito baixas nos períodos de estiagem, não se mostrando viável realizar medições através método do flutuador (SANTOS *et al.*, 2001).

Em grandes bacias hidrográficas com significativa contribuição do fluxo subterrâneo e em bacias com precipitação ao longo do ano todo a contribuição do escoamento de base para a vazão do rio pode ser expressiva e não deve ser ignorada. No entanto, para a maioria dos canais urbanos e para córregos menores a contribuição do escoamento de base pode ser desprezada (USACE, 2000). Desta forma o escoamento de base foi desconsiderado, pois não se dispõem de dados de vazão para o seu cálculo.

6.3.4 Método de Escoamento em Canais: Muskingum-Cunge

O método para simular o escoamento de canais utilizado durante a modelagem hidrológica foi Muskingum-Cunge. O método é considerado bastante vantajoso pois requer poucos dados, além de ser indicado para rios com baixa declividade, que possuam de planícies de inundação e estão sujeitos à maré. Na literatura há relatos

de resultados satisfatórios (FONSECA NETO *et al.*, 2020; SONG; KONG; ZHU, 2011). A Tabela 2 traz os valores de rugosidade da fórmula de Manning necessários para o cálculo da vazão nos trechos de rio em que foi empregado o método de Muskingum-Cunge.

Tabela 2 – Valores do coeficiente de rugosidade da fórmula de Manning.

	Natureza das Paredes dos Canais Arroios e Rios	Condições dos Canais			
		Muito Boas	Boas	Regulares	Más
1	Limpos, retilíneos e uniformes	0,025	0,028	0,030	0,033
2	Como no 1º, porém com vegetação e pedras	0,030	0,033	0,035	0,040
3	Com meandros, bancos e poços pouco profundos, limpos	0,035	0,040	0,045	0,050
4	Como no 3º, águas baixas, declividade fraca	0,040	0,045	0,050	0,055
5	Como no 3º, com vegetação e pedras	0,033	0,035	0,040	0,045
6	Como no 4º, com pedras	0,045	0,050	0,055	0,060
7	Com margens espaiadas, pouca vegetação	0,050	0,060	0,070	0,080
8	Com margens espaiadas, muita vegetação	0,075	0,100	0,125	0,150

Fonte: Porto (1998).

Todos os cursos da BHISF foram considerados como sendo “com meandros, bancos e poços pouco profundos, limpos, águas baixas, declividade fraca e em boas condições” com coeficiente n de Manning igual a 0,045 (linha 4 da Tabela 2). Exceção a bacia de contribuição do Igarapé fundo, que foi modelada de forma concentrada e não se aplica este método.

Foi adotada a seção retangular como seção típica para os trechos de rio do modelo, os valores de largura e profundidade média dos trechos foram mensurados por meio médio de medidas realizadas in loco, por imagens de satélite ou pela ortofotografia da parte urbana da BHISF, gerada pela PMRB.

6.4 A CRIAÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO

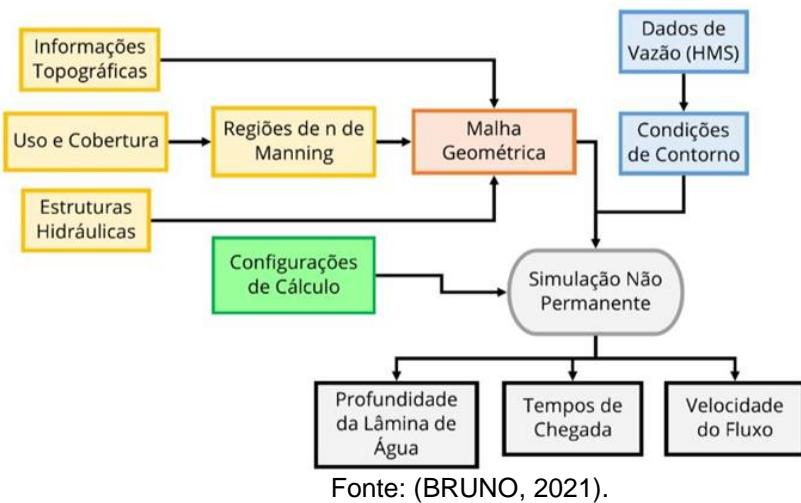
Conforme discutido no Capítulo Fundamentação Teórica, existem dois grupos principais de abordagens para modelagem de inundação quanto à aplicação de conceitos físicos teóricos. Os métodos empíricos baseados em dados, como medições, pesquisas, sensoriamento remoto e modelos e o método conceitual hidrodinâmico que inclui métodos unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais para simular o movimento da água. Os modelos hidrodinâmicos são fortemente empregados na determinação da área de inundação em função de uma chuva de projeto pré-determinada (TENG; 2017) e os modelos empíricos podem ser usados na calibração de outros modelos.

Para realização da simulação hidrodinâmica do nível da água foi utilizado o software HEC-RAS 6.4.1. O software possui um ambiente que permite a retirada de informações necessárias à modelagem hidráulica de um MDT. De modo que, é possível delinear as áreas de inundação ao considerar o volume de água que ultrapassa as margens do rio na região de várzea, utilizando informações fornecidas pelo MDT.

Para fluxos em regime não permanente, o programa usa algoritmos baseados na equação da continuidade para resolver a equação de águas rasas. As variáveis de entrada são os hidrogramas obtidos no HEC-HMS, o hidrograma de nível a jusante no Rio Acre e a topografia da área de inundação. Já o coeficiente de Manning associado as condições dos trechos de rio e do relevo no entorno do canal é o principal parâmetro. A Figura 12 ilustra o fluxo de trabalho dentro do HEC-RAS.

Por questões práticas a área de realização da modelagem hidráulica foi restrita a parte mais urbanizada da BHISF, com início no encontro entre o ISF e o Igarapé Dias Martins, em Rio Branco no Bairro Conquista, até a foz do ISF, no Rio Acre — Figura 7. Esse trecho compreende os bairros mais afetados pela recente inundação de histórica de março de 2023 (AMARAL, 2023).

Figura 13 — Fluxograma de trabalho HEC-RAS.



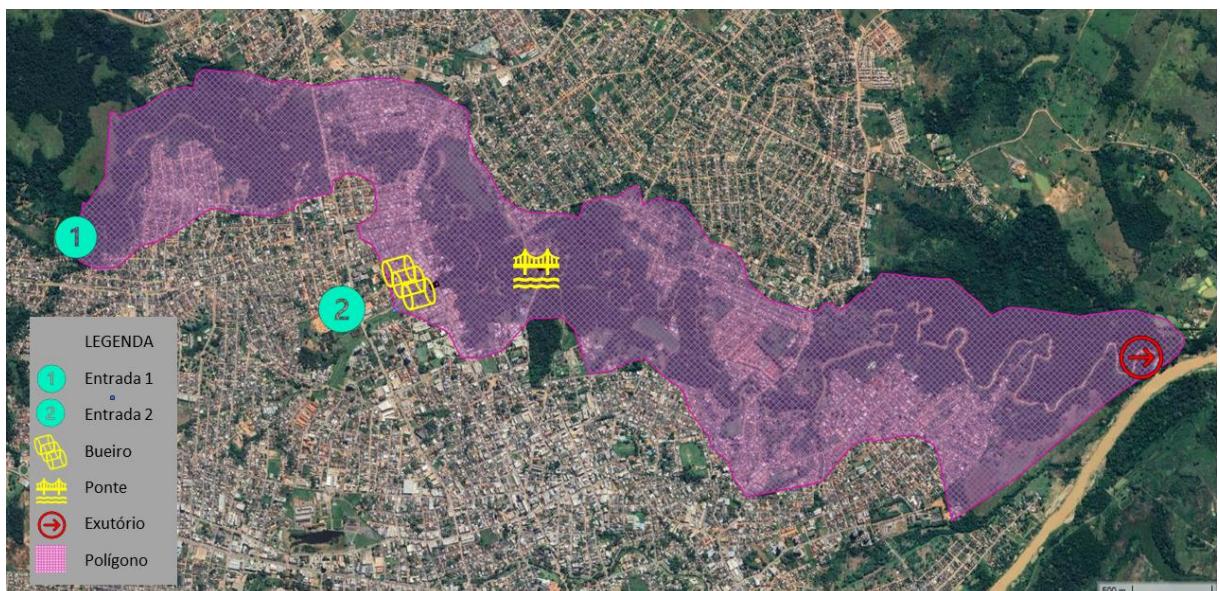
Fonte: (BRUNO, 2021).

A construção do modelo hidrodinâmico teve início no RAS Mapper, componente SIG próprio do HEC-RAS. Primeiramente foi definido o sistema de referência geodésico Sirgas 2000 19S, logo após o MDT disponibilizado pela PMRB foi adicionado ao programa.

A modelagem 2D no HEC-RAS requer a definição prévia da área de estudo por meio da construção de polígono fechado 2D. A área do polígono 2D é a área dentro da qual a inundação tende a ocorrer. O polígono 2D é definido de duas maneiras diferentes para otimização das células 2D. A primeira maneira consiste em definir o polígono que englobará a parte da área de estudo previamente identificada por satélite como propensa a inundações em condições severas de precipitação. O segundo método resume-se em conectar elevações, como montanhas, onde a inundação não se estenderá além das feições, é adotado geralmente quando os dados de satélite não estão disponíveis para a área de estudo, ou também pode auxiliar na criação do polígono juntamente com método anterior.

Após definir o polígono as células computacionais são geradas (Figura 14), elas podem ficar em uma grade retangular chamada grade escalonada e no limite do polígono 2D, ou as células podem ser uma grade não escalonada que é composta por polígonos irregulares com 3 a no máximo 8 lados. O espaçamento da célula retangular foi mantido em 10 m, de modo que a resolução da malha não fique mais precisa que o MDT, nem eleve muito o tempo de processamento, mas, também, não seja grosseira a ponto de afetar os resultados (SURWASE, 2008).

Figura 14 — Polígono, entradas e estruturas adotadas na modelagem hidráulica.



Fonte: elaboração própria.

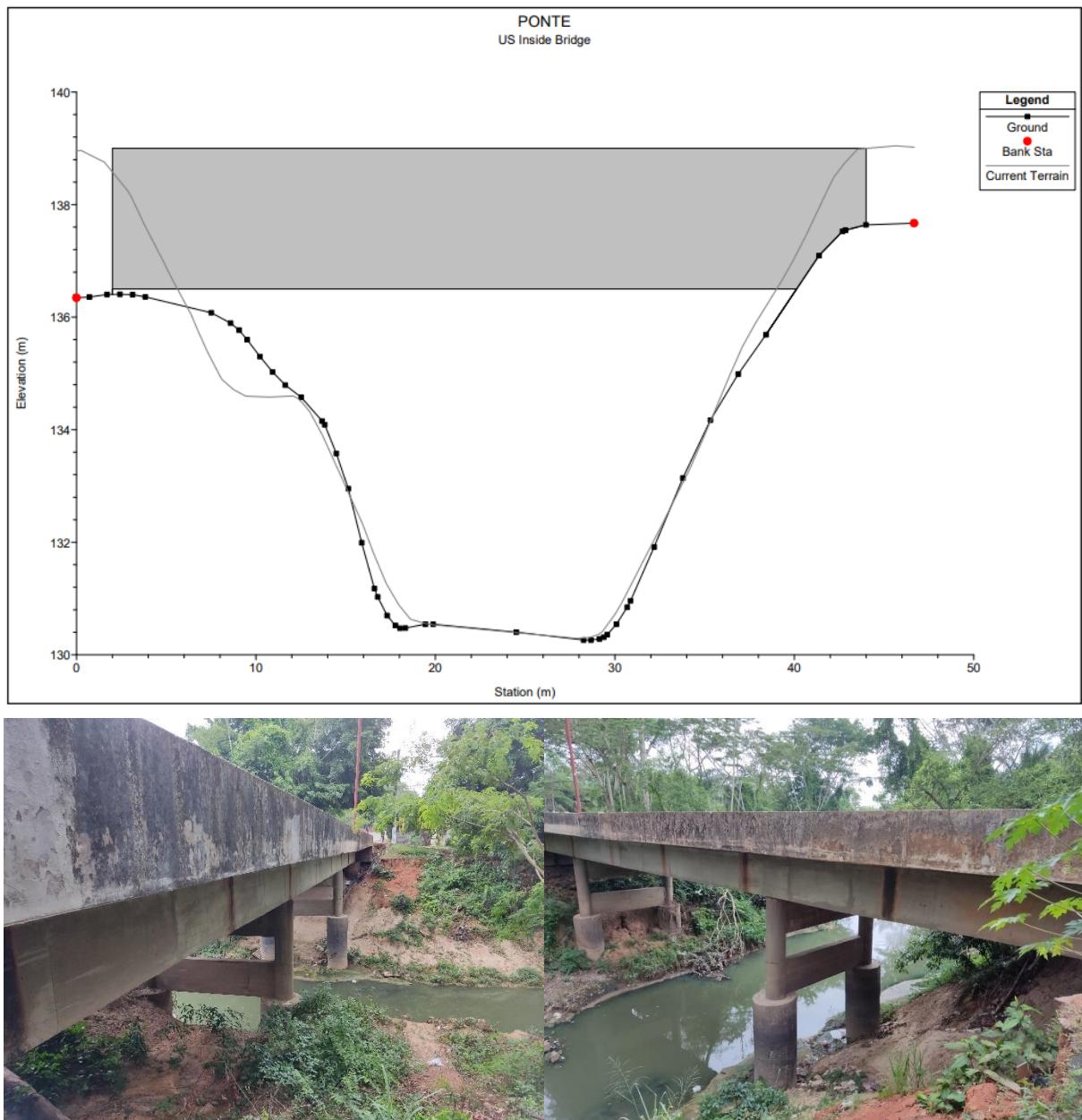
O tempo de processamento adotado foi de 10 segundos, o suficiente para evitar instabilidades (SHARKEY, 2014), pois uma redução ainda maior do intervalo de tempo de computação teria impacto mínimo, já que acarretaria aumento no tempo de execução do modelo sem melhorar muito a sua precisão (ALIPOUR, JAFARZADEGAN, MORADKHANI; 2022).

Para que a estimativa da área de inundação tenha uma boa representatividade, é necessário o levantamento e definição de seções topobatimétricas representativas das condições de escoamento (seções que integram a batimetria do canal com a topografia da planície de inundação). Porém as imagens que deram origem ao MDT disponibilizado pela PMRB foram capturadas em sobrevoos realizados no período de estiagem, quando o ISF apresenta cota muito baixa, assim considerou-se que o MDT representa significativamente a calha do canal.

Variações das condições hidráulicas do canal também podem causar instabilidade numérica durante a simulação, essas variações podem ocorrer devido às mudanças de declividade do fundo do canal, presença de pontes, ilhas, obstruções, alargamentos ou estreitamentos da seção transversal, dentre outros motivos (MONTE, 2016). Após sucessivas visitas de reconhecimento a área de estudo, onde buscou-se identificar os locais de variação das condições hidráulicas do rio e com o auxílio do MDT nessa análise, foi constatado o encurtamento significativo na ponte

localizada na Travessa Camboriú. Sendo assim, a ponte foi modelada, conforme suas dimensões representadas Figura 15.

Figura 15 — Ponte localizada na Travessa Camboriú.



Fonte: elaboração própria.

De maneira semelhante, os bueiros que realizam a drenagem da bacia do Igarapé Fundo através da Avenida Getúlio Vargas em direção ao Igarapé São Francisco (Figura 16) foram modelados no HEC-RAS considerando suas características físicas, por meio da função “culvert”.

Figura 16 — Bueiros localizados no que cruzam a Avenida Getúlio Vargas



Fonte: elaboração própria.

6.4.1 CALIBRAÇÃO

Para obter uma simulação precisa do nível máximo d'água durante uma inundação, deve-se investir esforços na calibração do coeficiente de rugosidade da planície de inundação (ALIPOUR, JAFARZADEGAN, MORADKHANI; 2022).

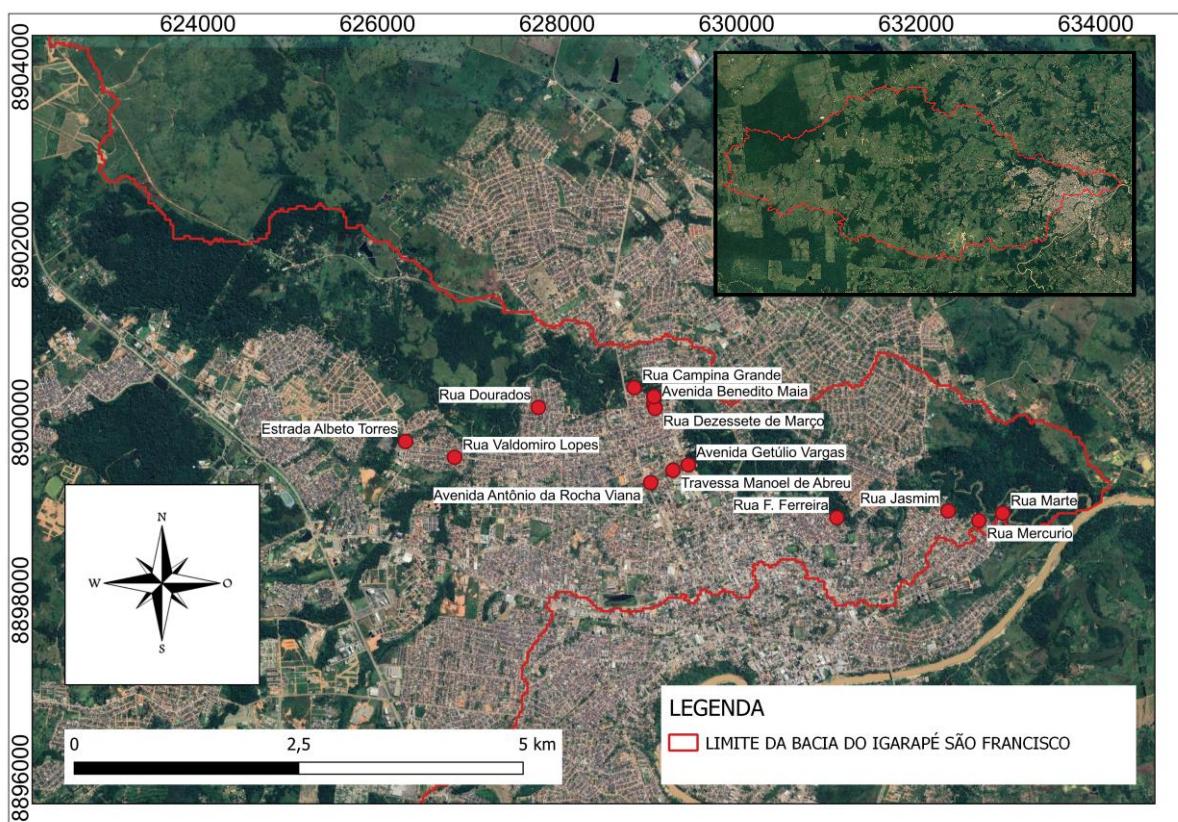
A calibração do sistema é extremamente importante para atribuir confiança ao modelo, Garcia e Junior (2022) utilizaram para a validação da modelagem acoplada HEC-HMS e HEC-RAS a análise de correlação dos resultados de modelagem com dados de registros de ocorrências da defesa civil, porém sem conseguir a calibração do sistema, não encontraram êxito na metodologia proposta.

Neto *et al.* (2015) realizaram testes de calibração contínua e por eventos, ambos de forma manual, para modelos hidrológicos. Os resultados indicaram que a simulação contínua torna inviável a aplicação de um conjunto único de parâmetros para períodos chuvosos e de estiagem. A abordagem mais eficiente foi a calibração dos modelos com base em dois eventos de cheia, seguida pela validação com outros seis eventos. Ao comparar com a profundidade da água em Palmares, observou-se uma superestimação da profundidade calculada pelo modelo HEC-RAS, embora tenha apresentado uma boa concordância com a extensão da área inundada.

Para a calibração do sistema foi adotado o evento histórico que teve início dia 23 de março 2023. Nesse dia a estação pluviométrica da UFAC, localizada na cidade de Rio Branco e inserida na BHISF, registrou uma precipitação diária de 173 mm. De acordo com Oliveira *et al.* (2022) o tempo de retorno estimado para esse evento de figura entre 69 e 100 anos.

Para verificar a extensão da área inundada, no dia 24 e março durante o período da manhã, ainda durante a inundação, foi realizada a coleta de dados. O levantamento consistiu em marcar pontos das extremidades da área inundada com auxílio de um GPS. Esses locais foram escolhidos de acordo com a capacidade de acesso e distribuídos ao longo da margem sul do Igarapé São Francisco e estão indicados na Figura 17. A margem norte foi checada via fotos e conversas com moradores, pois o acesso estava restrito durante o evento devido a interdição de algumas pontes.

Figura 17 – Distribuição espacial dos pontos de coleta de dados durante a inundação de março de 2023.



Fonte: (MANSANO; SERRANO, 2023).

A partir da combinação feita entre o MDT e as curvas de nível correspondentes à área de estudo e os pontos coletados em campo às margens da área inundada durante o evento histórico de março de 2023, foi possível delinear empiricamente a área total atingida pelo evento seguindo a curva de nível de cota de cada ponto e extrapolando para toda área de estudo. Quando pontos próximos apresentaram cotadas distintas foi realizada interpolação, com a intenção de manter os efeitos da onda de inundação, tendo em vista que o escoamento é dinâmico.

O evento também foi simulado no HEC-HMS e no HEC-RAS, a chuva de projeto utilizada foi construída com base nos dados de volume precipitação de hora em hora, coletados da estação pluviométrica Rio Branco 104, operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, próxima a cidade de Rio Branco.

7 RESULTADOS E DISCURSÕES

7.1 CHUVA DE PROJETO

Conforme esperado, dentre as chuvas de projetos calculadas para os tempos de retorno de 5, 10, 25, 50, e 100 anos, a chuva de tempo de retorno de 100 anos apresenta a maior intensidade chuvosa calculada por meio da IDF de Rio Branco (FRAGOSO, 2004), 10,54 mm/h. No entanto a relação entre as intensidades aumenta seguindo uma aproximação potencial. Ou seja, para um tempo de retorno já expressivo, seu aumento pode não acarretar um aumento tão significativo na intensidade chuvosa. A Tabela 3 apresenta a relação entre os tempos de retorno, precipitação total, intensidade e duração da chuva.

Tabela 3 — Duração e intensidade da chuva para cada evento.

Evento	Duração da chuva (h)	Intensidade chuva mm/h	Precipitação Total (mm)
TR 05	20	6,49	129,80
TR 10	20	7,26	145,22
TR 25	20	8,42	168,46
TR 50	20	9,42	188,48
TR 100	20	10,54	210,88
Março 2023	14	12,37	173,20

Fonte: calculado pelo autor com base em INMET (2023) e Fragoso (2004).

A duração crítica da chuva para a BHISF é de 20 horas e a desagregação realizada por meio do método de Huff deu origem as chuvas de projetos nos diferentes tempos de retorno. A chuva utilizada para calibração foi de 173,2 mm como duração aproximada de 14 horas, registrada pela estação de pluviométrica Rio Branco A104. A Tabela 4 apresenta os dados de chuva registrados em diferentes momentos durante o dia 23 de março de 2023, demonstrando distribuição temporal da chuva ao longo do evento. É importante notar que esses dados de chuva ajudam a entender a relação entre a precipitação e o evento de inundação.

Tabela 4 - Logradouro e coordenada dos pontos as margens da área de inundação do evento de março de 2023.

Data	Horário	Chuva (mm)					
		TR 05	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100	mar/23
23/03/2023	5:00	3,89	4,36	5,05	5,65	6,33	0,2
23/03/2023	6:00	3,89	4,36	5,05	5,65	6,33	6,2
23/03/2023	7:00	3,89	4,36	5,05	5,65	6,33	15,6
23/03/2023	8:00	3,89	4,36	5,05	5,65	6,33	11,6
23/03/2023	9:00	3,89	4,36	5,05	5,65	6,33	28
23/03/2023	10:00	5,19	5,81	6,74	7,54	8,44	21,2
23/03/2023	11:00	5,19	5,81	6,74	7,54	8,44	25,6
23/03/2023	12:00	5,19	5,81	6,74	7,54	8,44	16
23/03/2023	13:00	6,49	7,26	8,42	9,42	10,54	12,4
23/03/2023	14:00	7,79	8,71	10,11	11,31	12,65	16,6
23/03/2023	15:00	9,09	10,17	11,79	13,19	14,76	13
23/03/2023	16:00	15,58	17,43	20,22	22,62	25,31	0,8
23/03/2023	17:00	16,87	18,88	21,90	24,50	27,41	2
23/03/2023	18:00	11,68	13,07	15,16	16,96	18,98	3,4
23/03/2023	19:00	7,79	8,71	10,11	11,31	12,65	0,6
23/03/2023	20:00	5,19	5,81	6,74	7,54	8,44	
23/03/2023	21:00	3,89	4,36	5,05	5,65	6,33	
23/03/2023	22:00	3,89	4,36	5,05	5,65	6,33	
23/03/2023	23:00	2,60	2,90	3,37	3,77	4,22	
24/03/2023	00:00	3,89	4,36	5,05	5,65	6,33	

Fonte: calculado pelo autor com base em INMET (2023) e Fragoso (2004).

7.2 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

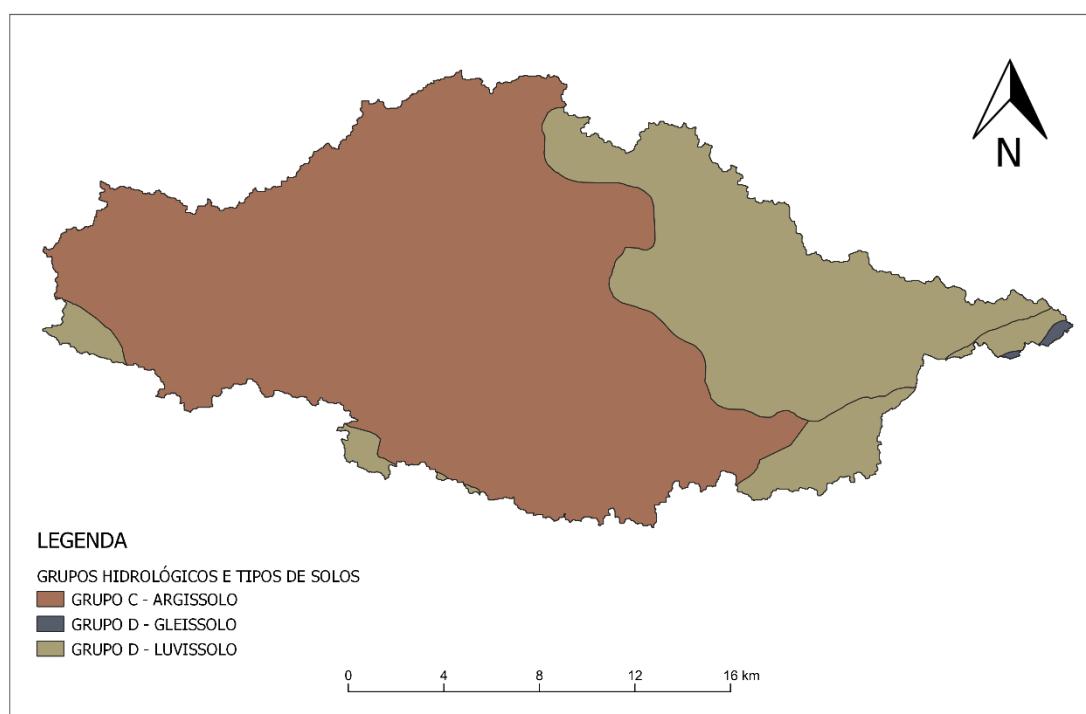
A Figura 18 apresenta a distribuição espacial dos grupos hidrológicos dos solos BHISF. Ao examinar os dados, nota-se que a área de estudo apresenta solos com elevado potencial de escoamento superficial.

Apenas solos enquadrados nos grupos hidrológicos C e D foram registrados na BHISF. O grupo hidrológico C é predominante, abrangendo 68,83% da extensão territorial, estendendo-se principalmente pela porção leste da bacia. Os solos do grupo C, geralmente, apresentam uma textura média/argilosa, são profundos e possuem uma taxa de infiltração baixa (SARTORI, LOMBARDI NETO E GENOVEZ, 2005). No caso da BHISF, o grupo C é formado basicamente por Argissolo.

Localizado predominantemente na porção oeste, o grupo hidrológico D compreende 31,17% da área da BHISF, abrangendo toda a área urbanizada e as planícies fluviais do Igarapé São Francisco e Rio Acre. Os solos do grupo D demonstram características de textura argilosa, são rasos e apresentam baixa taxa

de infiltração (SARTORI, LOMBARDI NETO E GENOVEZ, 2005). Os solos da BHISF que compõe o grupo D são Gleissolos e ocupam uma área restrita próxima ao exultório da bacia, às margens do Rio Acre, a grande maioria do grupo D é composta por Luviossolos.

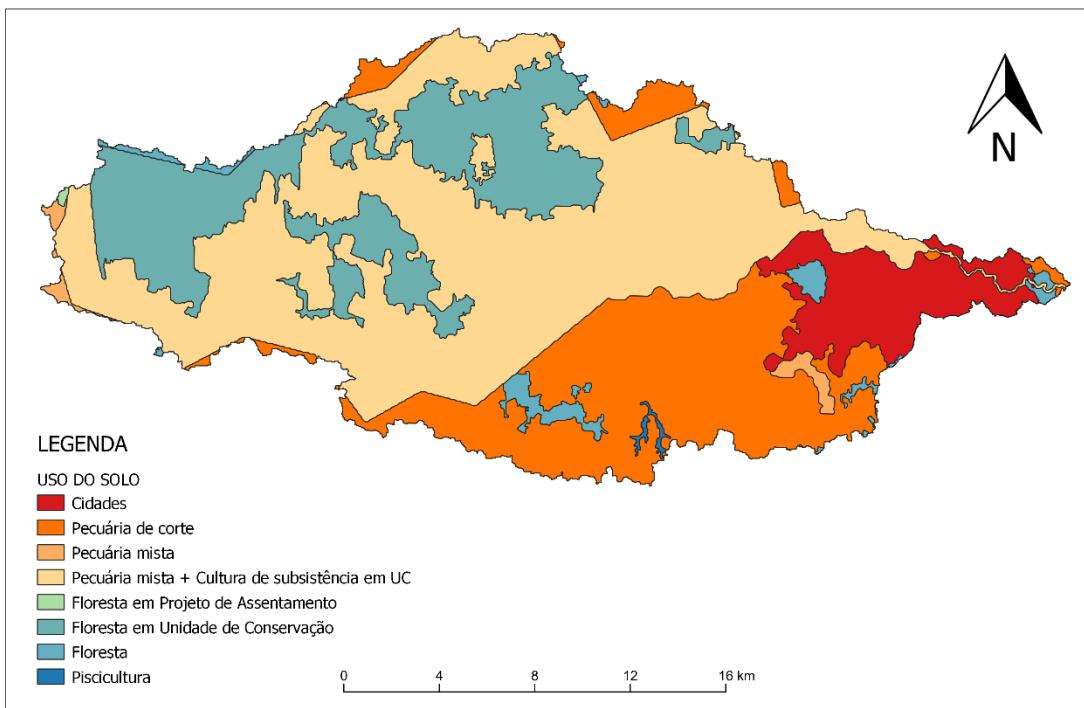
Figura 18 — Grupos hidrológicos e tipos de solos da BHISF.



Fonte: Fonte: adaptado de (ZEE, 2006).

Com base em um recorte específico dos dados do ZEE, originou-se um conjunto de 8 categorias de uso e cobertura do solo da BHISF, conforme Figura 19. A área ocupada por cada categoria é a seguinte: Pecuária mista + Cultura de subsistência em Unidade de Conservação (UC) abrange 205,882 km², representando 46,15% da área total. A Pecuária de corte ocupa 104,246 km², correspondendo a 23,37% da área total. A Floresta em UC comprehende 87,791 km², o que equivale a 19,68% da área total. A Cidade ocupa 34,37 km², representando 7,70% da área total. A Floresta abrange 9,01 km², correspondendo a 2,02% da área total. A Pecuária mista comprehende 3,794 km², representando 0,85% da área total. A Piscicultura ocupa 0,825 km², correspondendo a 0,18% da área total. A Floresta em Projeto de Assentamento abrange 0,238 km², representando 0,05% da área total. Nota-se que mais de 70% da área da BHISF é destinada a pecuária.

Figura 19 — Uso e ocupação do solo da BHISF.

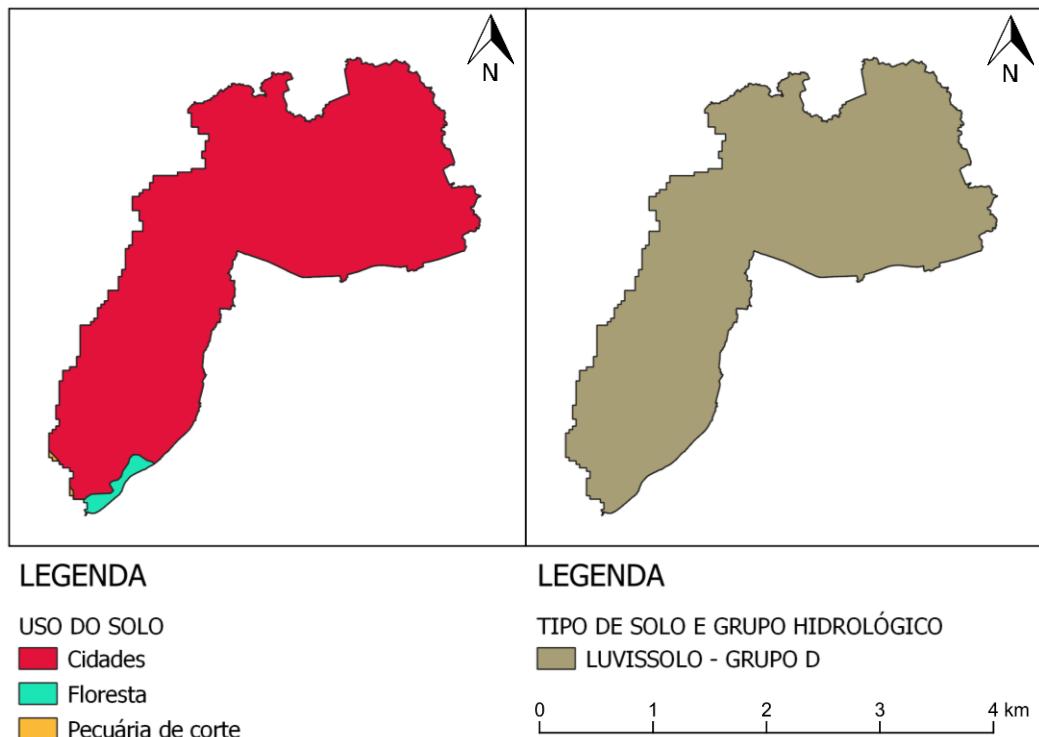


Fonte: adaptado de (ZEE, 2006).

Uma análise semelhante foi empregada na BHIF, o recorte aproximado revelou que a BHIF compreende boa parte da área urbanizada da BHISF. Configurando-se como uma sub-bacia de contribuição praticamente toda urbanizada, cerca de 98,67%, com exceção, apenas, de pequenas áreas de floresta e pecuária de corte, correspondentes a 1,25% e 0,08%, respectivamente. O solo da desta sub-bacia é inteiramente formado por Luviossolo e está inserido no grupo hidrológico D, como pode ser observado na Figura 20. O valor médio de CN para a BHIF é 86,66.

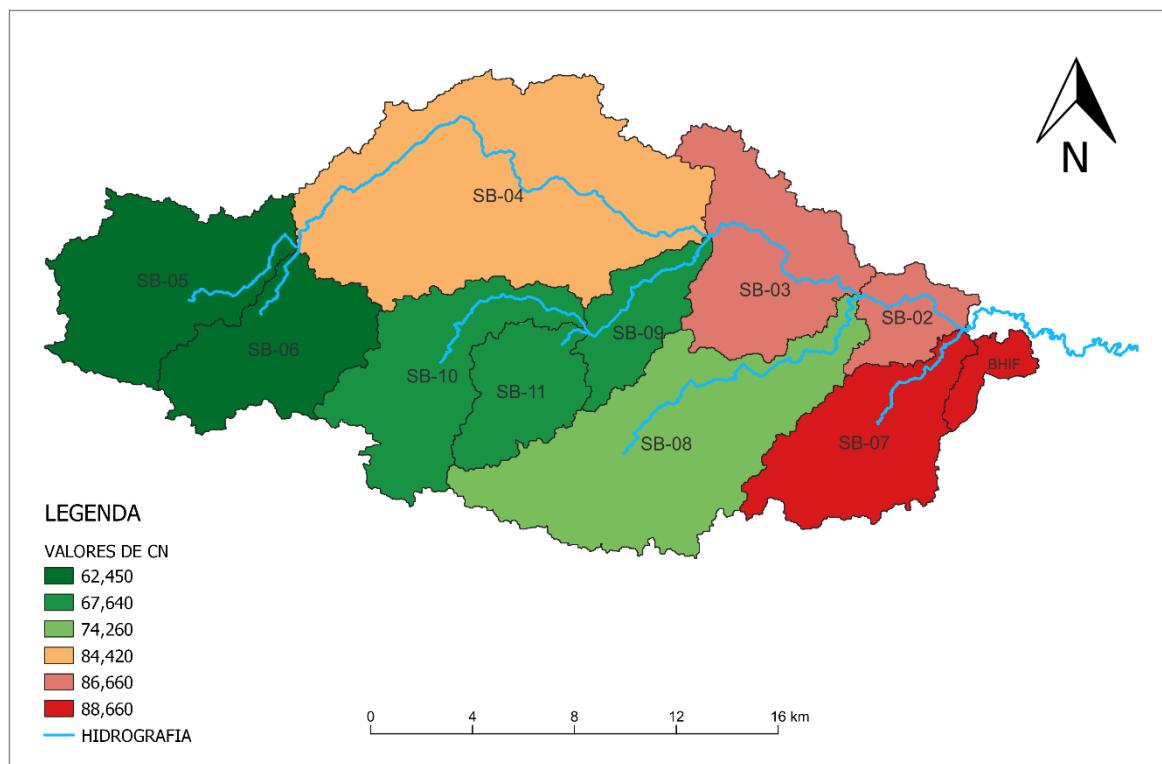
A Figura 21 exibe a distribuição espacial do parâmetro CN na região de estudo. As regiões com coloração mais quente indicam valores mais elevados para o CN, ao passo que as áreas com tonalidades mais frias refletem valores menores. Nesse contexto, cada sub-bacia foi associada a um valor de CN calculado por meio de sobreposição.

Figura 20: Grupos hidrológicos e tipos de solos da BHIF.



Fonte: Fonte: adaptado de (ZEE, 2006).

Figura 21 — CN especializado por sub-bacias da BHISF.



Fonte: adaptado de (ZEE, 2006).

7.3 PRÉ-PROCESSAMENTO

Durante o pré-processamento foram calculados os parâmetros mais importantes na simulação hidrológica. Na Tabela 5 é possível visualizar os parâmetros: CN, infiltração potencial máxima, abstração inicial, além da área de cada sub-bacia.

Tabela 5 — Área, CN, infiltração potencial máxima e abstração inicial por sub-bacia.

Sub-bacias	Área (km ²)	CN Médio	Infiltração potencial máxima (mm)	Abstração inicial (mm)
SB-01	17,728	81,103	59,18	11,84
SB-02	13,051	82,727	53,03	10,61
SB-03	40,658	82,267	54,75	10,95
SB-04	103,23	75,625	81,87	16,37
SB-05	46,775	74,583	86,56	17,31
SB-06	34,586	74,286	87,92	17,58
SB-07	37,496	81,455	57,83	11,57
SB-08	73,834	81,000	59,58	11,92
SB-09	17,432	80,714	60,69	12,14
SB-10	39,957	76,556	77,78	15,56
SB-11	21,273	76,556	77,78	15,56
BHIF	5,9991	92,000	22,09	4,42

Fonte: elaboração própria.

Vale destacar que o parâmetro CN está relacionado ao tipo de uso e ocupação do solo, grupo hidrológico do solo e umidade antecedente. No método de cálculo de perdas adotado, SCS-CN, a infiltração potencial máxima e a abstração inicial também estão relacionadas as características espaciais. Observa-se que sub-bacias que apresentam valores iguais de CN, também possuem valores idênticos de infiltração potencial máxima e a abstração inicial.

Os valores das variáveis comprimento do talvegue, declividade e desnível do talvegue oriundos do pré-processamento estão descritos na Tabela 6. Eles foram utilizados no cálculo do tempo de concentração e “lag time” para cada sub-bacia, também apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 — Comprimento, declividade e desnível do talvegue, tempo de concentração e “lag time” de cada sub-bacia.

Sub-bacias	Talvegue (km)	Declividade (m/m)	Desnível do talvegue (m)	Tempo de concentração (min)	Lag time (min)
SB-01	18,1197	0,0022	40,23	390,22	234,13
SB-02	8,2948	0,0040	33,43	169,95	101,97
SB-03	14,4373	0,0039	56,31	263,70	158,22
SB-04	26,5009	0,0024	63,87	506,65	303,99
SB-05	14,9214	0,0032	47,60	292,25	175,35
SB-06	11,7424	0,0050	58,83	204,24	122,55
SB-07	16,3455	0,0028	45,44	330,55	198,33
SB-08	25,2769	0,0023	57,13	500,77	300,46
SB-09	10,6554	0,0037	39,53	212,76	127,66
SB-10	17,5675	0,0028	48,49	350,39	210,23
SB-11	10,4424	0,0028	28,72	235,08	141,05
BHIF	6,9671	0,0062	43,47	125,57	75,34

Fonte: elaboração própria.

Os trechos de rios são formados no HEC-HMS a partir de junções entre sub-bacias ou rios e sub-bacias. Ao longo do curso do rio, quando um trecho de rio se depara com outra corrente fluvial ou exutório de uma sub-bacia é formado um novo trecho de rio. O comprimento do trecho de rio não necessariamente é equivalente ao comprimento do talvegue da sub-bacia pela qual ele atravessa, pois o curso d’água gerado na modelagem hidrológica é na maioria das vezes diferente do comprimento do maior curso d’água presente na sub-bacia.

Tabela 7 – Parâmetros característicos dos trechos de rio.

	Rio 01	Rio 02	Rio 03	Rio 04
Comprimento (m)	5792,46	9307,48	24458,37	7702,96
Declividade (m/m)	0,0008	0,0013	0,0008	0,0012
Desnível (m)	4,4602	12,0997	20,5450	9,3976
Manning	0,045	0,045	0,045	0,045
Vazão (m³/s)	2,59	3,37	2,71	1,71
Largura	7	7	7	4
Desnível (m)	0,8	0,8	0,8	0,8
Área Molhada (m²)	5,6	5,6	5,6	3,2
Perímetro Molhado (m)	8,6	8,6	8,6	5,6
Raio Hidráulico (m)	0,65	0,65	0,65	0,57

Fonte: elaboração própria.

A modelagem hidrológica deu origem a 4 trechos de rio, os dados da Tabela 7 foram calculados para modelar a propagação de ondas de enchentes em rios ou canais, por meio do método Muskingum-Cunge.

7.4 MODELOS HIDROLÓGICOS

As chuvas de projeto dos diferentes tempos de retorno simuladas retornaram os hidrogramas descritos nas Figura 22 e Figura 23. O primeiro hidrograma de vazão afluente representa a vazão no exutório da bacia de contribuição formada pela sub-bacias de 02 a 11 e o segundo hidrograma expressa a vazão de saída na sub-bacia do Igarapé Fundo. Destaca-se que uma parcela da área urbana que compreende a sub-bacia 01 não foi considerada no estudo, pois grande parte dessa área corresponde a área inundada e o restante forma várias pequenas sub-bacias com vazões baixas, praticamente irrelevantes.

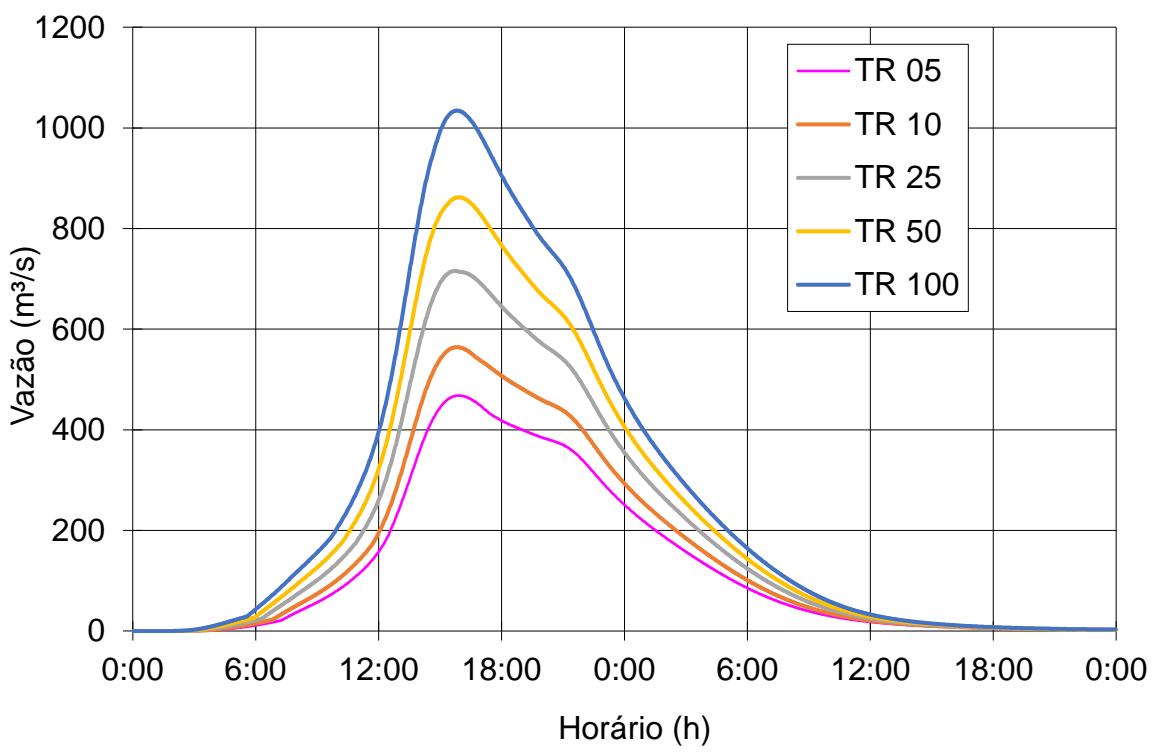
Nas condições apresentadas na metodologia, para o tempo de retorno de 5 anos a vazão de pico no exutório da Bacia de Contribuição figura próxima a 467,9 m³/s e é registrada 15 horas e 52 minutos após o início da chuva. No maior tempo de retorno simulado, 100 anos, a vazão máxima obtida foi 1034,3 m³/s, registrada 15 horas e 48 minutos após o início da chuva. Nota-se que o aumento do tempo de retorno acarreta maior vazão de pico. Porém não há uma tendência clara na variação do tempo de retorno que se alcança a vazão de pico, sendo todos os tempos relativamente próximos a 15 horas e 50 minutos.

O hidrograma de vazão afluente da Bacia de Contribuição Principal (Figura 22) destaca a influência do tempo de retorno na vazão que chega na sub-bacia 01, esses valores serão empregados como dado de entrada na modelagem hidráulica, conforme descrito na sessão 6.4.

Por ser uma bacia menor e mais impermeabilizada, a BHIF leva menos tempo para atingir sua vazão de pico, o que ocorre entre 13 horas e 36 minutos e 13 horas e 42 minutos, em todos os tempos de retorno simulados. A BHIF apresentou vazões de pico de 22,0 m³/s no tempo de retorno de 5 anos e 38,5 m³/s no tempo de retorno de 100 anos. Observa-se que o escoamento é mais rápido e o período de recessão é de

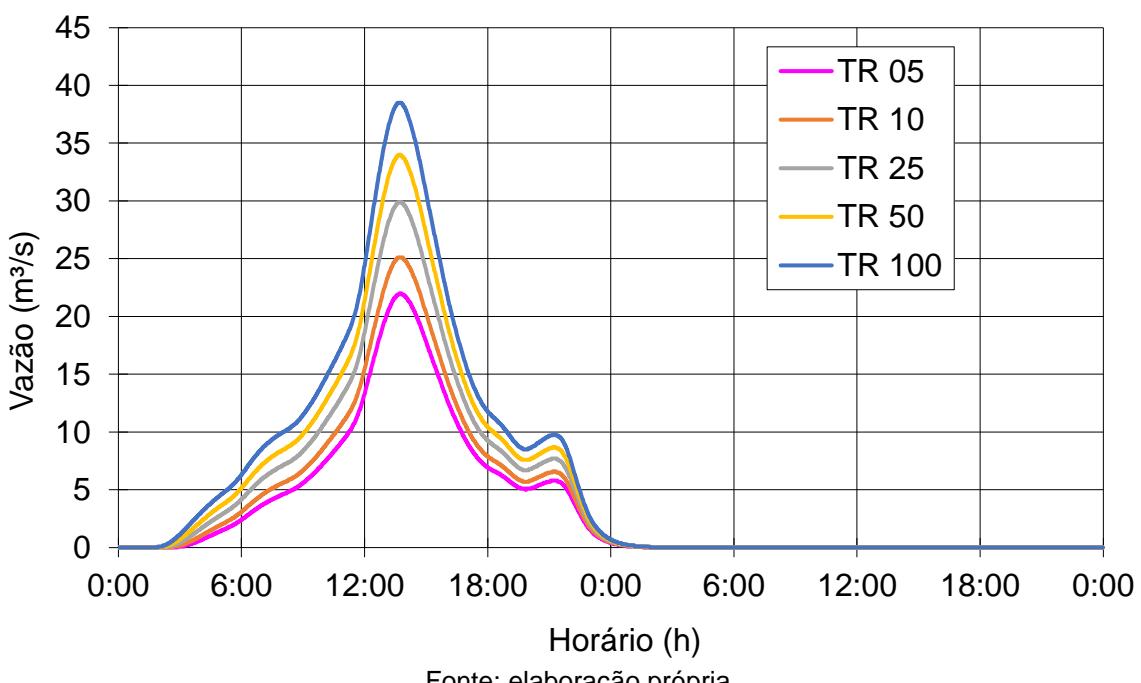
cerca de 6 horas, praticamente metade do período de recessão da Bacia de Contribuição Principal.

Figura 22 — Hidrograma afluente da Bacia de Contribuição Principal nos tempos de retorno: (a) 100 anos; (b) 50 anos; (c) 25 anos; (d) 10 anos; (e) 5 anos.



Fonte: elaboração própria.

Figura 23 — Hidrograma afluente e efluente da sub-bacia do Igarapé Fundo nos tempos de retorno: (a) 100 anos; (b) 50 anos; (c) 25 anos; (d) 10 anos; (e) 5 anos.



Fonte: elaboração própria.

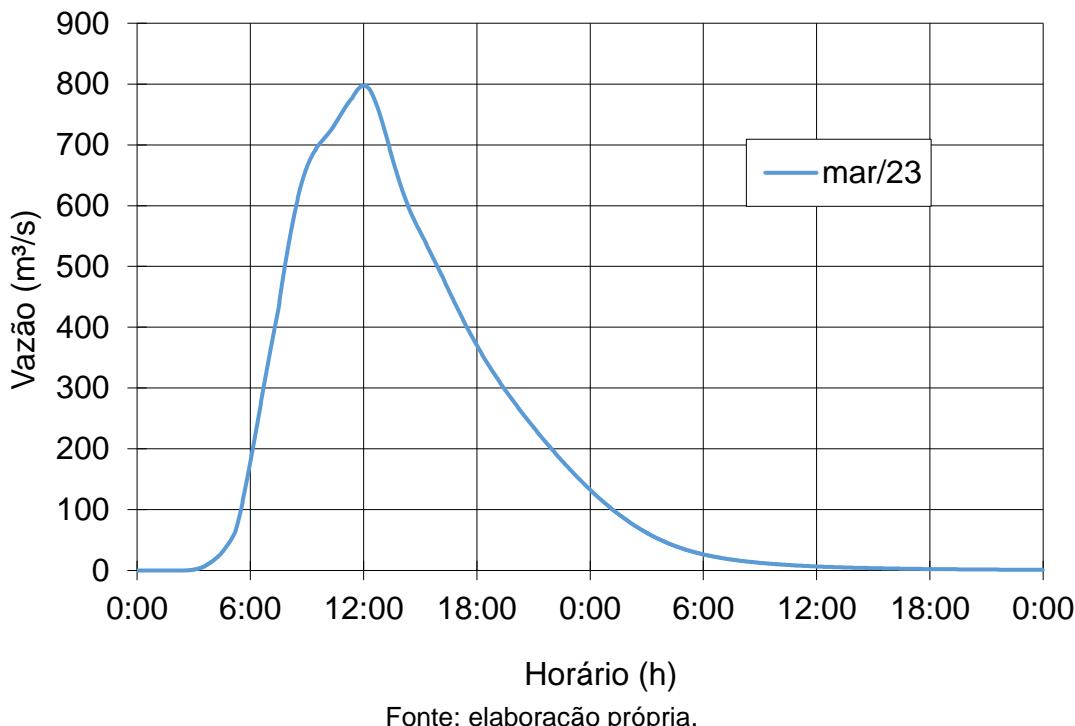
Assim como foram gerados os hidrogramas para as chuvas de projeto nos diferentes tempos de retorno, também foi simulada a chuva que atingiu Rio Branco no dia 23 de março de 2023. O modelo hidrológico retornou uma vazão de pico no exutório da Bacia de Contribuição Principal de $797,5 \text{ m}^3/\text{s}$, após 12 horas e 1 minuto de chuva (Figura 24). Segundo Oliveira *et al.* (2022) para uma chuva de 173 mm e 14 horas de duração, como foi a chuva registrada em março de 2023, o tempo de retorno estimado pelos quartis de Gumbel varia entre 69 e 100 anos. Percebe-se que a vazão de pico registra é um pouco menor que a vazão registrada para o TR 50 anos, porém é importante destacar que a duração dos eventos é diferente o que impede o estabelecimento de uma relação entre os eventos.

A chuva utilizada como entrada na simulação hidrológica foi distribuída segundo o método de Huff, utilizando-se o terceiro quartil por se tratar de uma chuva com duração de 20 horas. Assim, os maiores volumes de chuva se concentram do meio para o final, diferente de chuvas com duração menor que 12 horas, quando os maiores volumes ocorrem já no primeiro quartil. O pico da chuva mais próximo ao seu início faz com que a abstração inicial exerça um impacto significativo na área alagada gerada pelo modelo, visto que mais água infiltra no solo nos primeiros minutos da precipitação, desta forma ao considerar o pico de precipitação perto do início da chuva, tem-se seu efeito atenuado.

Por outro lado, a incorporação do terceiro quartil de Huff na distribuição intensifica o volume das precipitações, especialmente quando a duração leva à maior vazão de pico. Entretanto, é importante destacar que os efeitos da abstração inicial, neste caso, não minimizam a extensão das inundações, garantido, assim, o cenário mais desfavorável para a simulação. Não obstante, é válido mencionar que o aumento da vazão de pico gera apenas uma expectativa de grande inundação, que deve ser confirmada na modelagem hidrodinâmica, não há garantia de que isso culminará em uma expansão da área alagada.

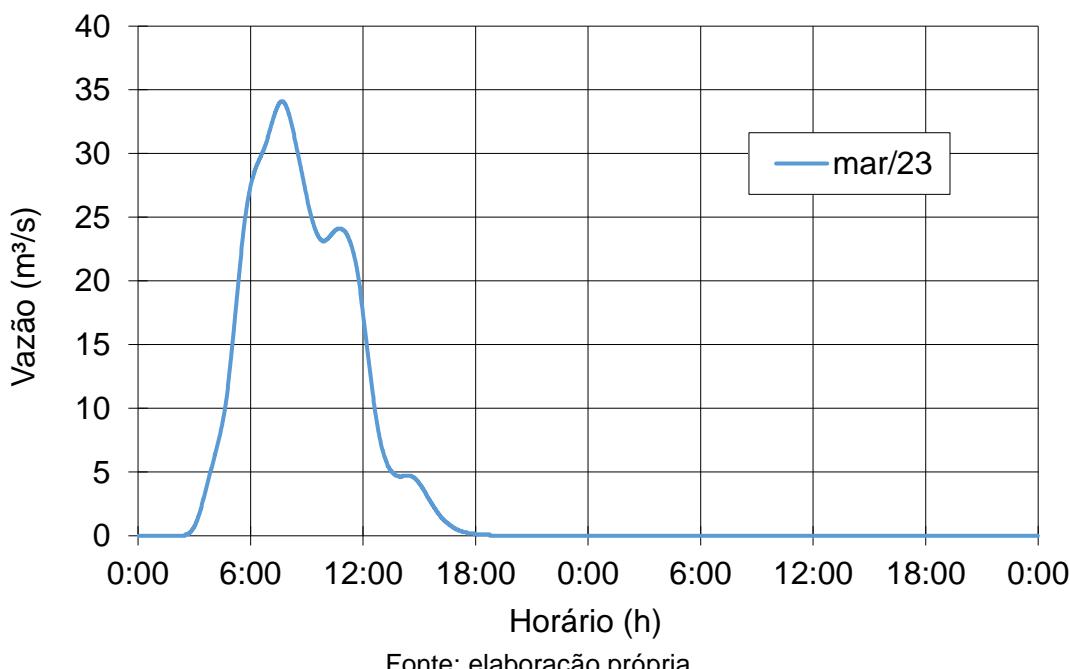
Nota-se que de maneira análoga ao que aconteceu na simulação das chuvas de projeto, o evento real também forneceu para a BHIF um hidrograma em que a vazão de pico de $34,6 \text{ m}^3/\text{s}$ é atingida mais rápido, em 7 horas e 36 minutos de precipitação (Figura 25), do que quando comparado com a Bacia de Contribuição Principal.

Figura 24 — Hidrograma de vazão afluente Bacia de Contribuição Principal para o evento de março de 2023.



Fonte: elaboração própria.

Figura 25 — Hidrograma de vazão afluente da Bacia do Igarapé Fundo para o evento de março de 2023.



Fonte: elaboração própria.

Como já destacado, não existem estações fluviométricas no ISF. Além disso, não foi possível realizar medidas de vazão durante o evento de março de 2023 em

virtude da grande dimensão da inundação. Desta forma não existem vazões associadas a eventos de precipitação determinados para a calibração do modelo hidrológico, a calibração foi realizada por meio da simulação hidráulica dos hidrogramas das Figura 24 e 25.

7.5 MODELOS HIDRÁULICOS

A simulação hidráulica da chuva de período de retorno de 5 anos originou uma área de inundação equivalente a 2,4110 km², representada na Figura 26. É possível observar a distribuição espacial das profundidades máximas de água registradas na simulação. A maior profundidade registrada é de 15,4 metros no exutório da BHISF, esse fenômeno que se repete nas demais simulações em virtude da adoção do hidrograma de nível do Rio Acre dos dias 23 a 27 de março de 2023 como condição de contorno a jusante. A condição de contorno a jusante contribui para a determinação da área de inundação e exerce impacto nas características do escoamento, como por exemplo a velocidade.

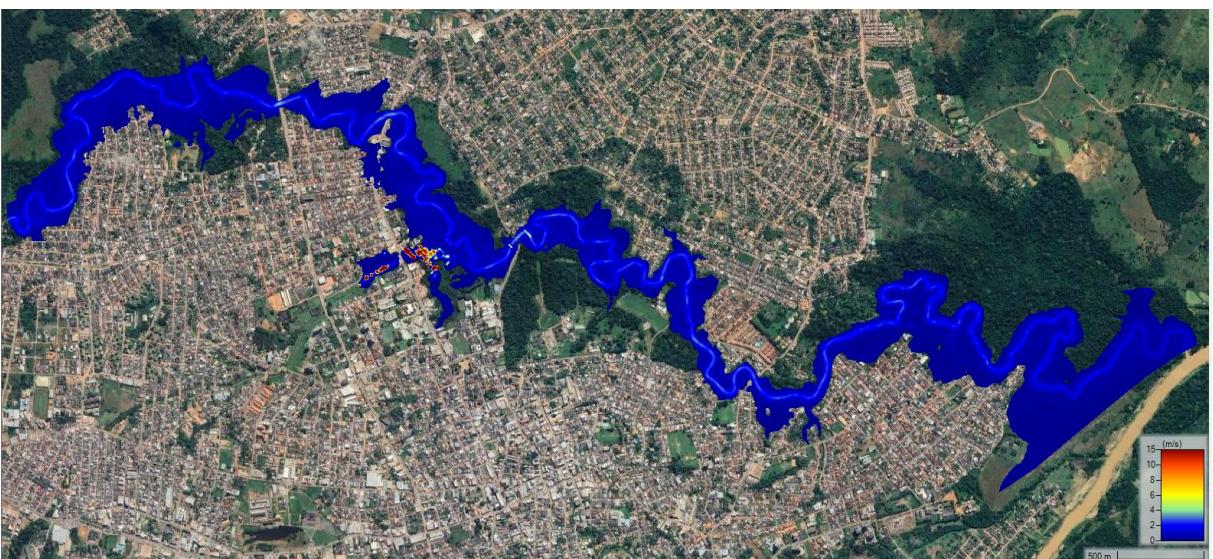
Com relação a velocidade máxima de escoamento ilustrada na Figura 27, as maiores velocidades foram registradas próximas ao exutório da Bacia do Igarapé Fundo, principalmente, devido ao fato do trecho ser canalizado e revestido em concreto, o que confere menor rugosidade ao fundo e as paredes do canal, também foram registradas velocidades elevadas no Igarapé São Francisco nos trechos próximos às pontes, onde geralmente existe o estreitamento do canal. De acordo com princípio da continuidade quando há diminuição da seção transversal, espera-se que ocorra um aumento da velocidade do escoamento.

Figura 26 — Mancha de inundação máxima gerada no HEC-RAS para o tempo de retorno de 5 anos.



Fonte: elaboração própria.

Figura 27 — Mapa ilustrativo das velocidades máximas de escoamento em cada do ISF gerada no HEC-RAS para o tempo de retorno de 5 anos.



Fonte: elaboração própria.

A área inundada resultante da simulação hidráulica da chuva de período de retorno de 10 anos foi de 2,6977 km², o que corresponde a um aumento de 10,5% em relação a área de inundação para o TR de 5 anos. A Figura 28 destaca os bairros que estão inseridos no polígono traçado na modelagem hidráulica 2D, a partir dela percebe-se na Figura 29 a mancha de inundação já alcança parte do Bairro Conquista,

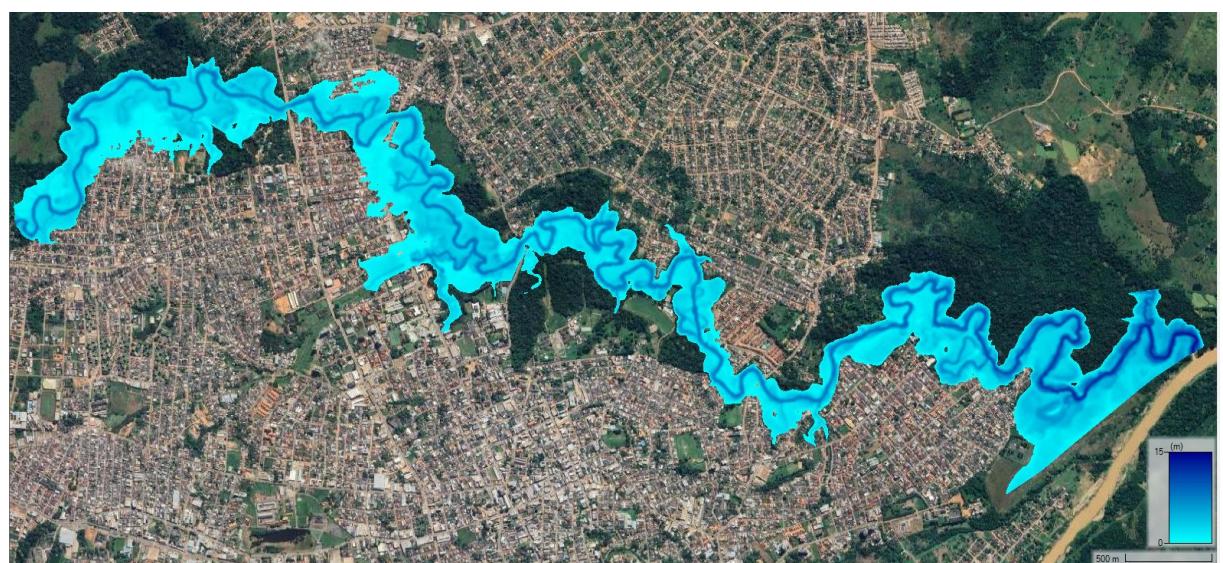
uma parte considerável da Vila Ivonete e grande parte do segmento da Avenida Getúlio Vargas próximo às margens do ISF.

Figura 28 — Bairros de Rio Branco próximos ao trecho do ISF modelado hidráulicamente.



Fonte: PMRB (2013).

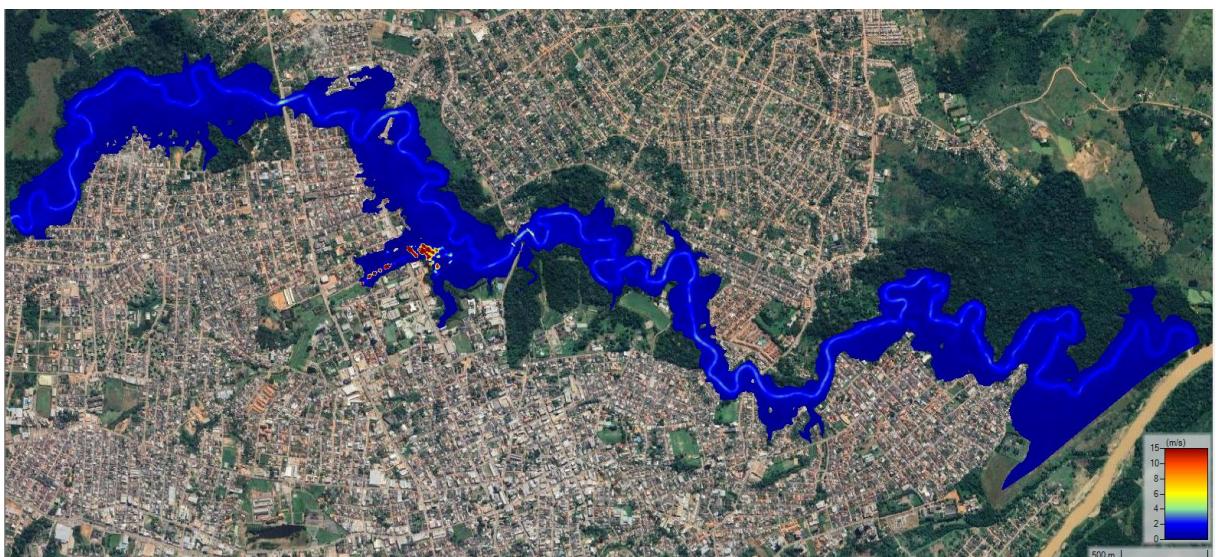
Figura 29 — Mancha de inundação máxima gerada no HEC-RAS para o tempo de retorno de 10 anos.



Fonte: elaboração própria.

Quanto a velocidade de escoamento registrada na simulação TR 10 anos (Figura 30), nota-se um singelo aumento da velocidade máxima ao longo do curso do ISF.

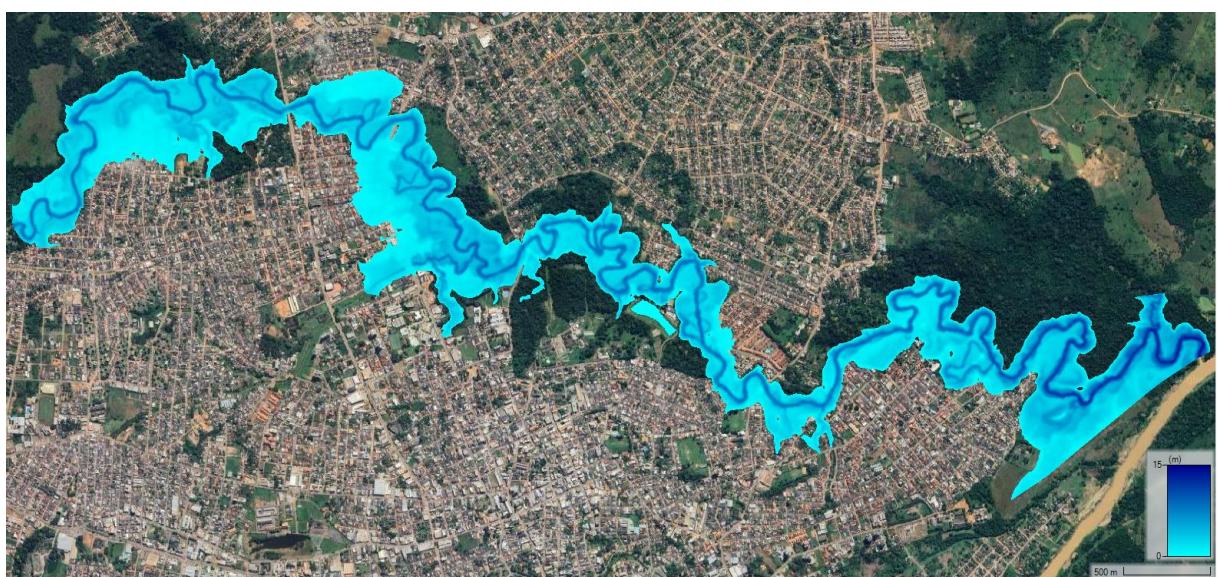
Figura 30 — Mapa ilustrativo das velocidades máximas de escoamento em cada do ISF gerada no HEC-RAS para o tempo de retorno de 10 anos.



Fonte: elaboração própria.

A chuva de projeto associada ao tempo de retorno de 25 anos gerou uma mancha de inundação de 2.6977 km², conforme pode ser observado na Figura 31. A área inundada já atinge praticamente todo o segmento da Avenida Getúlio Vargas entre a Ponte sobre o Igarapé São Francisco e a PGE. Na simulação a água já atinge grande parte dos bairros Vila Ivonete, Conquista e Raimundo Melo.

Figura 31 — Mancha de inundação máxima gerada no HEC-RAS para o tempo de retorno de 25 anos.



Fonte: elaboração própria.

As velocidades registradas na simulação aumentaram ligeiramente com o aumento no tempo de retorno e vazão máxima. A espacialização das velocidades máximas do escoamento gerado na simulação da chuva de TR 25 anos pode ser observada na Figura 32.

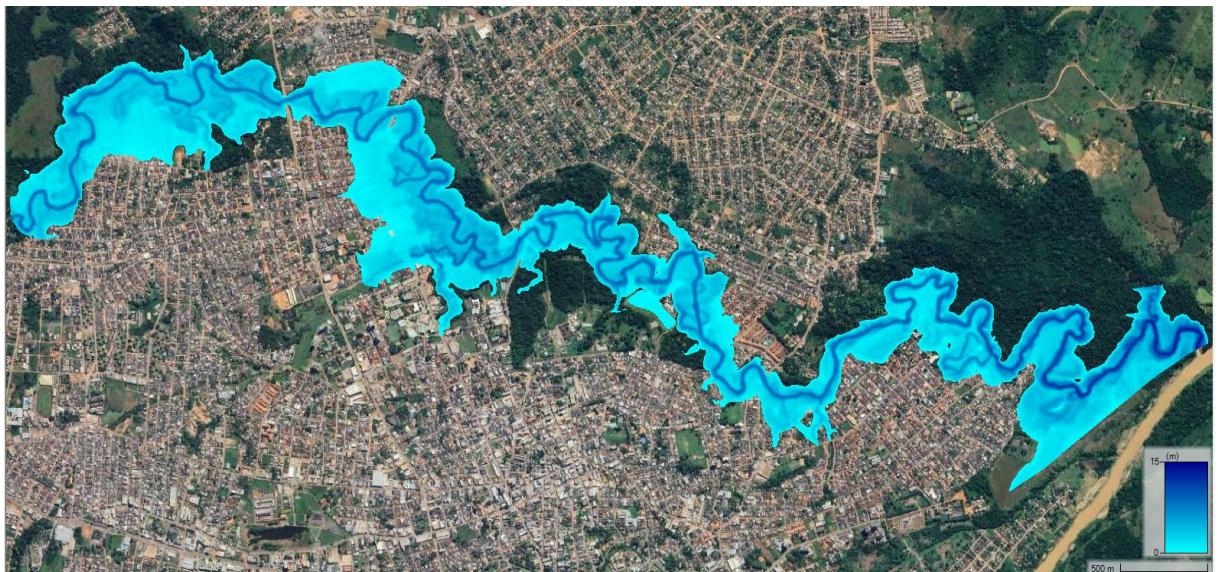
Figura 32 — Mapa ilustrativo das velocidades máximas de escoamento em cada do ISF gerada no HEC-RAS para o tempo de retorno de 25 anos.



Fonte: elaboração própria.

A chuva de projeto relacionada ao período de recorrência de 50 anos resultou em uma área inundada de 3.0612 km². Na Figura 33 é possível observar que a área inundada é muito semelhante a área obtida para o TR 25 anos, com pequenos aumentos nos bairros Conquista e Vila Ivonete. As velocidades máximas de escoamento (Figura 34) nessa simulação também foram maiores que as anteriores, o que pode indicar um perigo de enxurradas.

Figura 33 — Mancha de inundação máxima gerada no HEC-RAS para o tempo de retorno de 50 anos.



Fonte: elaboração própria.

Figura 34 — Mapa ilustrativo das velocidades máximas de escoamento em cada do ISF gerada no HEC-RAS para o tempo de retorno de 50 anos.



Fonte: elaboração própria.

A maior área de inundação foi obtida na simulação com chuva de projeto derivada do tempo de retorno de 100 anos e resultou em uma área inundada de 3.2102 km².

A comparação entre a mancha de inundação gerada na simulação de TR igual a 50 anos (Figura 33) e a mancha de inundação gerada na simulação de TR igual a

100 anos (Figura 35) revela que houve um avanço da área de inundação, principalmente sobre os Bairros Vila Ivonete, Bosque e Jardim Tropical, no maior TR.

Nessa simulação também foram registradas as maiores velocidades máximas de escoamento no ISF — Figura 36 — o que além de indicar um potencial enxurrada, pode comprometer estruturas e vidas, caso não seja feita a retirada da população das áreas de risco próximas as margens do rio.

Figura 35 — Mancha de inundação máxima gerada no HEC-RAS para o tempo de retorno de 100 anos.



Fonte: elaboração própria.

Figura 36 — Mapa ilustrativo das velocidades máximas de escoamento em cada do ISF gerada no HEC-RAS para o tempo de retorno de 100 anos.



Fonte: elaboração própria.

A calibração do modelo realizada por meio da simulação e ajuste da área de inundação do evento de março de 2023 resultou na mancha de inundação da Figura 37. A área inundada corresponde a 3,0093 km². Foram registradas velocidades próximas a 5 m/s no leito do ISF, conforme Figura 38.

Figura 37 — Mancha de inundação máxima gerada no HEC-RAS para o evento histórico de março de 2023.



Fonte: elaboração própria.

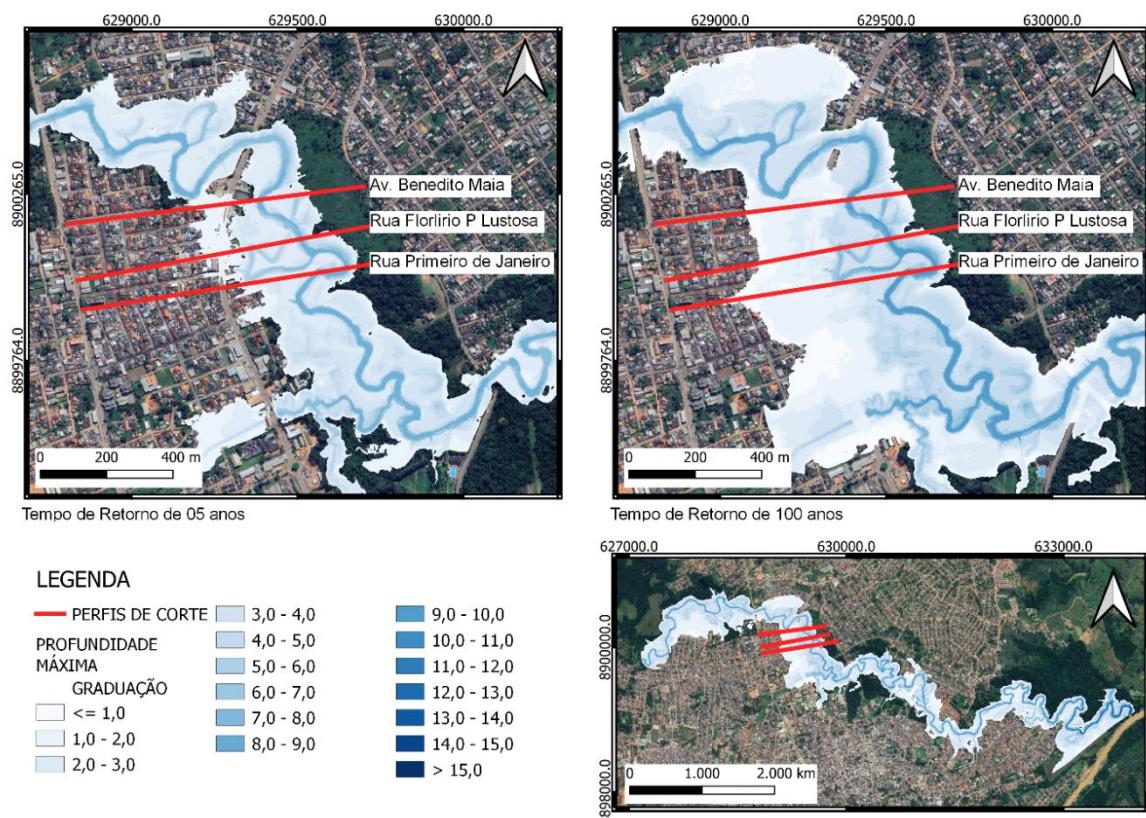
Figura 38 — Mapa ilustrativo das velocidades máximas de escoamento em cada do ISF gerada no HEC-RAS para o evento histórico de março de 2023.



Fonte: elaboração própria.

O Bairro Vila Ivonete, Figura 28, foi um dos mais afetados pela inundação do dia março de 2023, as simulações também indicaram que o Bairro pode ser impactado por inundação do ISF em todos os tempos de retorno adotados. A Figura 39 mostra um recorte da mancha de inundação na Vila Ivonete. A imagem destaca a maior profundidade com cores mais escuras, foram gerados três perfis para delimitar a cota da inundação ao longo da Rua Primeiro de Janeiro, Rua Florlirio P Lustosa e Avenida Benedito Maia (Figura 39).

Figura 39 — Profundidade da inundação no Bairro Vila Ivonete para as chuvas de TR 05 e 100 anos.

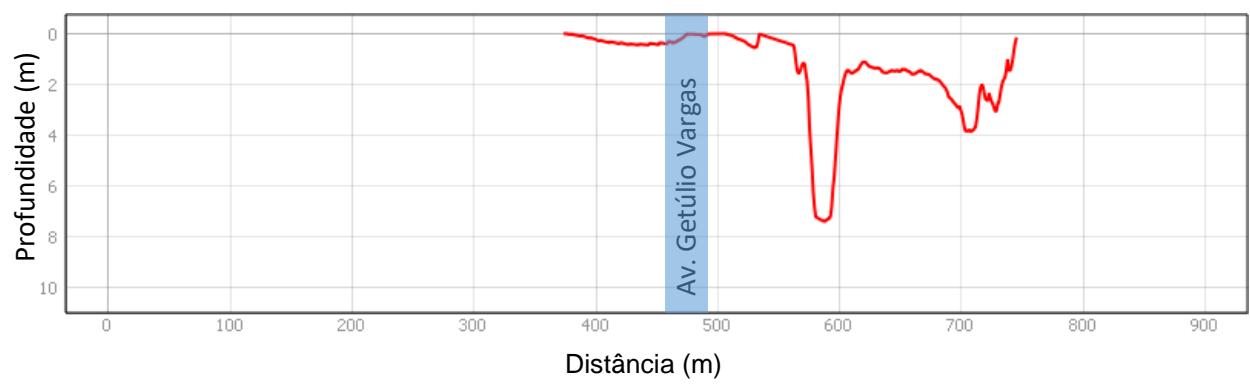


Fonte: elaboração própria.

A partir da análise do perfil no nível d'água da Figura 41, percebe-se que no tempo de retorno de 5 anos formou-se uma baixa lâmina d'água na rotatória do cruzamento entre as Avenidas Benedito Maia e Getúlio Vargas, entretanto a mancha de inundação não cobriu totalmente a área do cruzamento. A lâmina d'água apresentou uma profundidade média de cerca de 10 centímetros no eixo da Avenida Getúlio Vargas, chegando a 37 centímetros no ponto mais profundo da rotatória.

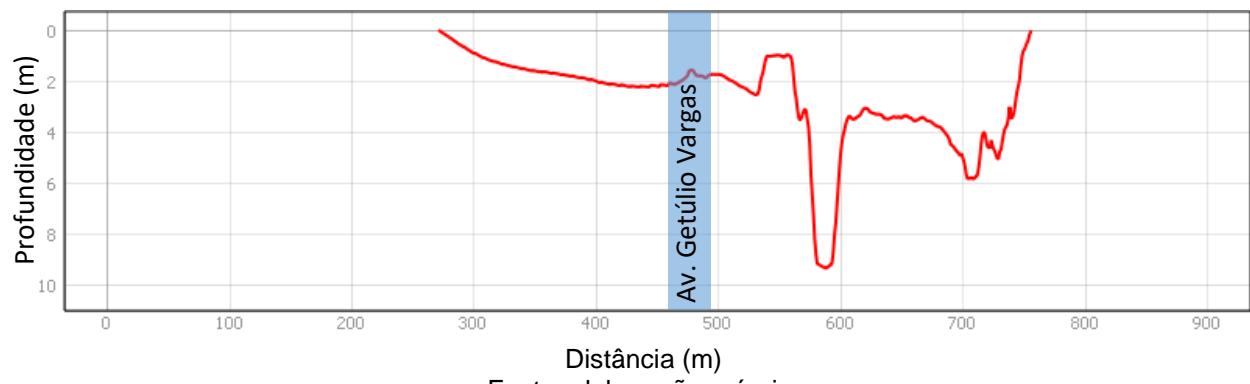
Com relação ao tempo de retorno de 100 anos (Figura 41) a profundidade média no eixo da Avenida Getúlio Vargas é cerca de 1,80 metros e o ponto mais profundo na rotatória atinge 2,12 metros. A profundidade máxima simulada na seção do rio observada no corte da Avenida Benedito Maia é de 7,40 e 9,34 metros, para os tempos de recorrência de 5 e 100 anos, respectivamente.

Figura 40 — Perfil transversal indicando a profundidade da inundação na Avenida Benedito Maia no TR 05 anos



Fonte: elaboração própria.

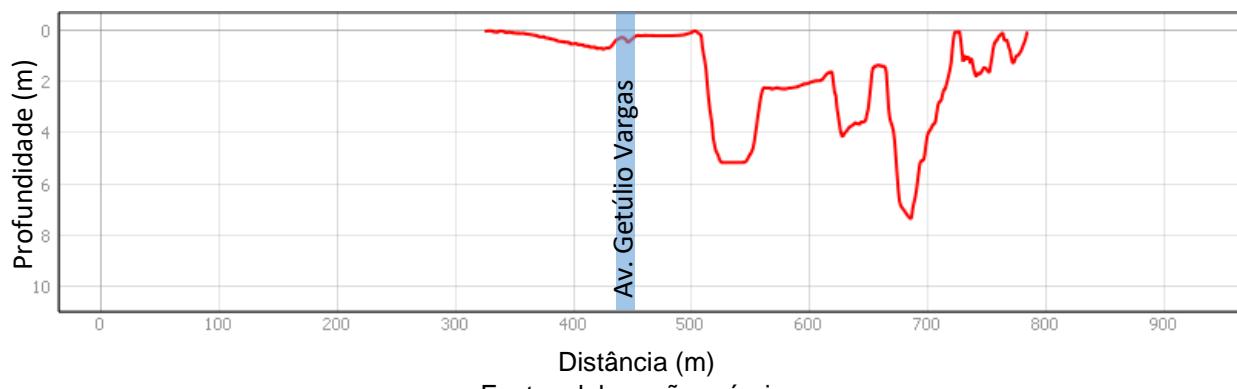
Figura 41 — Perfil transversal indicando a profundidade da inundação na Avenida Benedito Maia no TR 100 anos.



Fonte: elaboração própria.

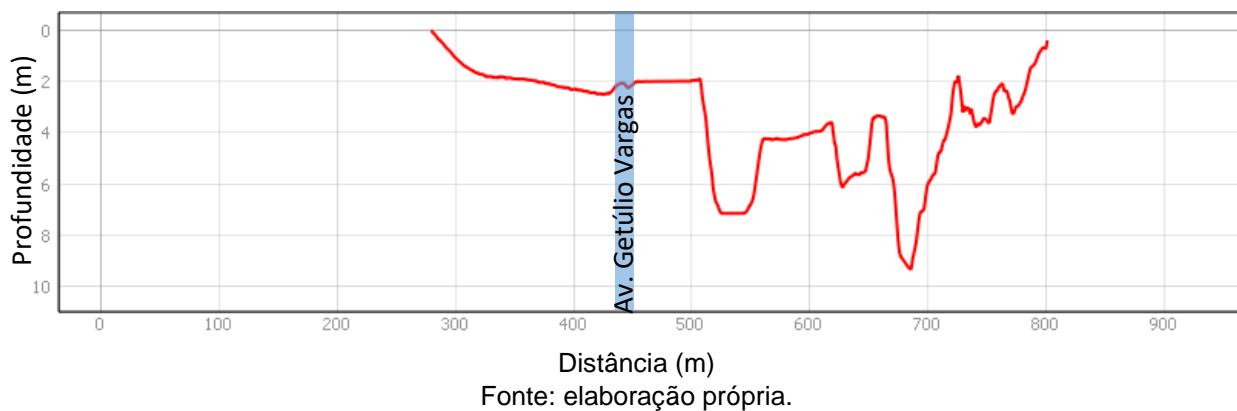
No cruzamento da Avenida Getúlio Vargas com a Rua Florlirio P Lustosa a água atinge uma cota de 0,46 metros no TR 05 (Figura 42) e 2,25 metros no TR 100 (Figura 43), já a profundidade no leito do rio é de 7,36 e 9,76 para TR 05 e TR 100, respectivamente.

Figura 42 — Perfil transversal indicando a profundidade da inundação na Rua Florlirio P Lustosano TR 05 anos.



Fonte: elaboração própria.

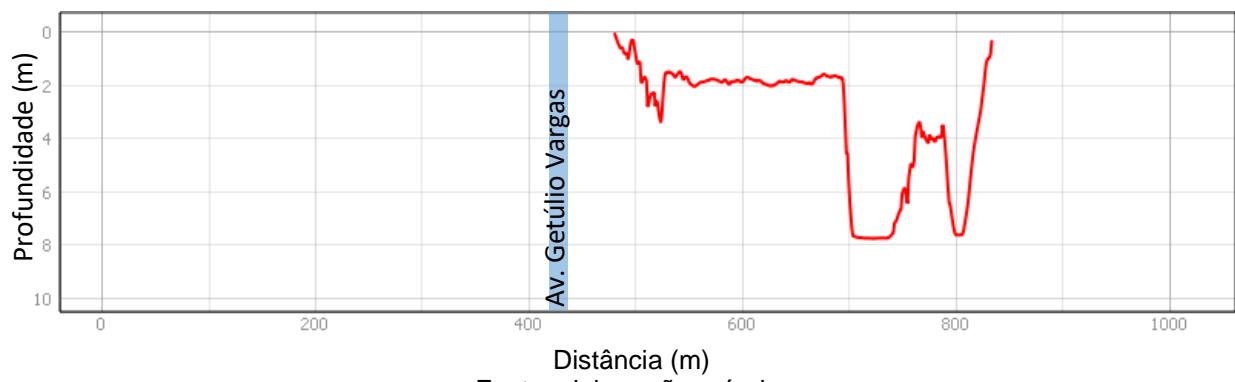
Figura 43 — Perfil transversal indicando a profundidade da inundação na Rua Florlirio P Lustosano no TR 100 anos.



Fonte: elaboração própria.

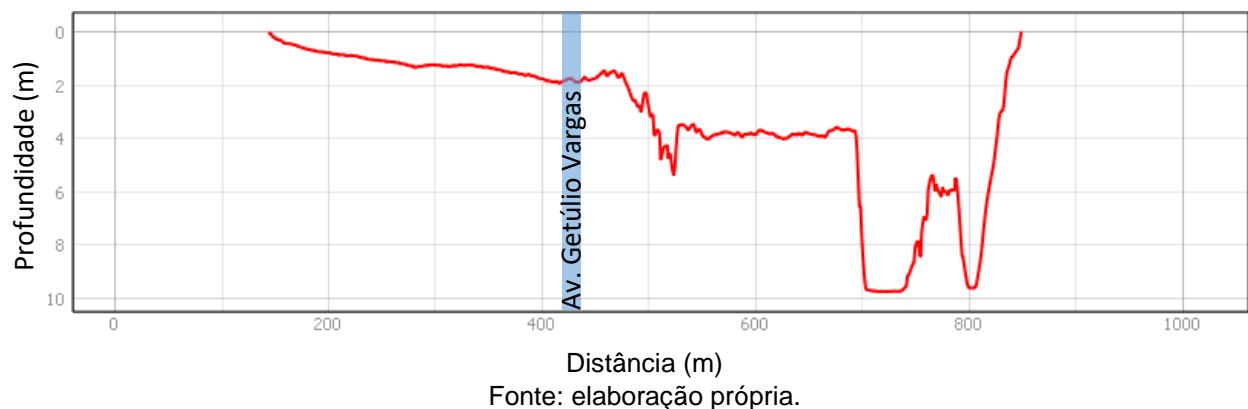
A Rua Primeiro de Janeiro para a inundação de tempo de retorno igual a 100 anos apresenta uma profundidade máxima de 9,74 metros no leito do ISF, enquanto para o tempo de retorno de 5 anos a cota é exatamente 2 metros menor. No cruzamento entre a Rua Primeiro de Janeiro e a Avenida Getúlio Vargas a cota chega a 1,87 metros para o tempo de retorno de 100 anos (Figura 45), enquanto na simulação de 5 anos de período de recorrência a água não atinge o cruzamento (Figura 44).

Figura 44 — Perfil transversal indicando a profundidade da inundação na Rua Primeiro de Janeiro no TR 05 anos.



Fonte: elaboração própria.

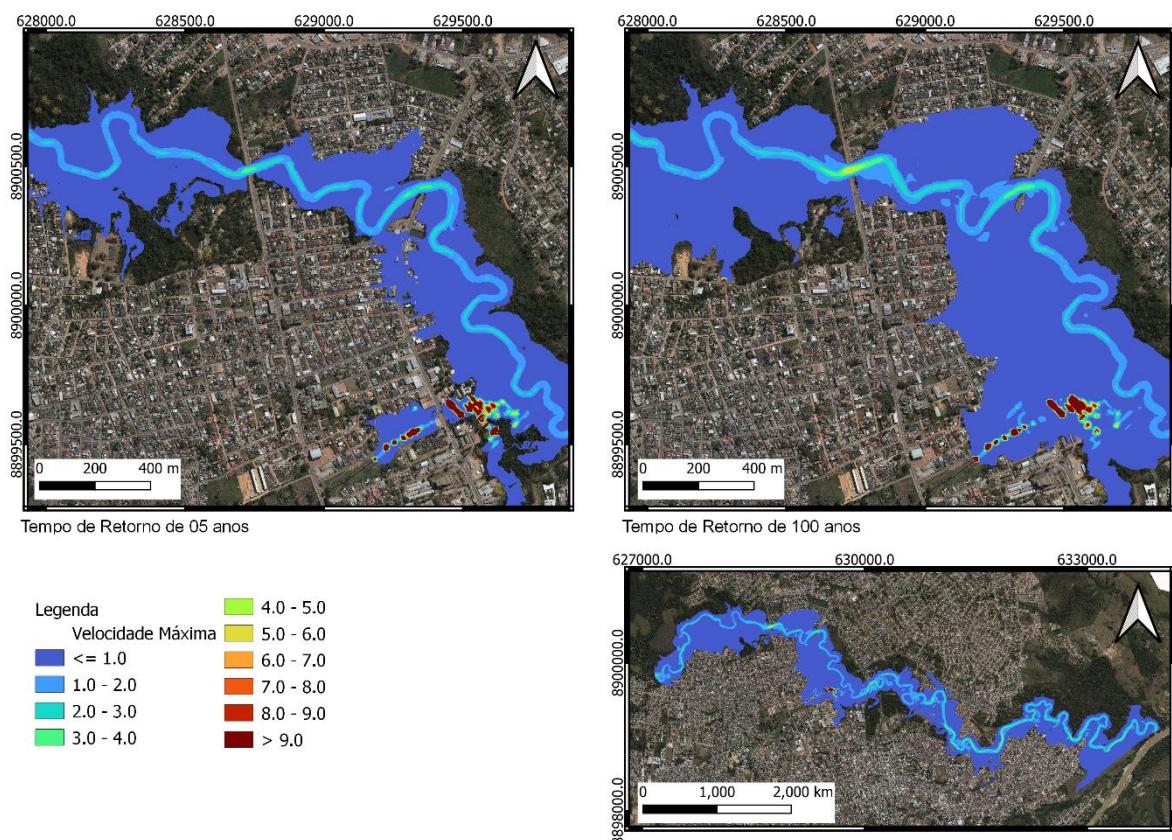
Figura 45 — Perfil transversal indicando a profundidade da inundação na Rua Primeiro de Janeiro no TR 100 anos.



Fonte: elaboração própria.

As maiores velocidades presentes nesse recorte foram registradas próximo ao limite entre os bairros Vila Ivonete e Bosque — na canalização de concreto do Igarapé Fundo — mais precisamente no bueiro modelado, onde as velocidades foram superiores a 9 m/s. Enquanto as maiores velocidades registradas no ISF foram identificadas nas proximidades da Ponte da Travessa Camboriú, onde observa-se pontos nos quais a velocidade ficou em torno de 10 m/s, entretanto a maior velocidade que pode ser observada numa faixa expressiva do escoamento é 4 m/s. A ponte sobre a Avenida Antônio da Rocha Viana também registrou velocidades de até 5 m/s em uma parte considerável do centro do escoamento, conforme Figura 46.

Figura 46 — Velocidade máxima do escoamento da inundação no Bairro Vila Ivonete para as chuvas de TR 05 e 100 anos.



Fonte: elaboração própria.

Existem alguns fatores que podem potencializar as enchentes e inundações na BHISF, um dos principais fatores é a condição de contorno a jusante, neste caso foi relacionada a cota de do Rio Acre para minimizar o efeito de jusante, comum em rios que estão próximos ao mar, grandes lagos ou rios de maior porte. Essa condição interfere no escoamento da água, pois afeta a declividade e a capacidade de escoamento ao longo do rio. A análise feita considera o Rio Acre em sua cota de transbordo, que é 14 metros, neste cenário a área de inundação sofre forte influência da inundação do Rio Acre nos Bairros Adalberto Aragão e Jardim Tropical. Em menor grau a inundação do Rio Acre tem pode ser percebida nos bairros Casa Nova e Baixa da Colina, assim entende-se que essa combinação eventos adotada na metodologia é um pouco pessimista, mas a modelagem no pior cenário possível atribui maior segurança a mancha de inundação encontrada.

A observação em campo e a análise do MDE indicam que o ISF enfrenta problemas significativos relacionados ao assoreamento e a formação de bancos de sedimentos ao longo do seu curso, além do acúmulo considerável de resíduos sólidos e entulho. Essas questões resultam na criação de obstáculos ao fluxo natural, aumentando a resistência ao escoamento e agravando os impactos das inundações.

A PRMB no mês de julho de 2023 identificou carcaças de carros, restos de casas, geladeiras e sofás ao longo do igarapé e realizou uma limpeza que abrangeu uma extensão de 12 quilômetros do igarapé, concentrando-se especialmente em uma área crítica de cerca de 7 quilômetros com acúmulo de entulho. Métodos manuais e o uso de caminhões de sucção foram empregados, incluindo uma escavadeira hidráulica para a limpeza do canal (JARES, 2023).

Conforme supracitado o levantamento que deu origem ao MDE utilizado nessa pesquisa é anterior a limpeza do Igarapé São Francisco, desta forma as alterações das condições encontradas no MDE podem criar uma incerteza na calibração, caso sejam utilizados eventos posteriores a limpeza, ocasionando uma dificuldade de comparação de resultado de trabalhos futuros. Porém, espera-se que com a limpeza haja uma diminuição da rugosidade do canal e consequentemente um aumento na velocidade do escoamento diminuindo possibilidade de transbordamento do ISF.

Outro fator importante está relacionado ao uso e ocupação do solo, maiores áreas de vegetação na cabeceira da bacia tem a capacidade de atrasar o hidrograma, com isso o tempo de duração crítica se torna cada vez maior e menos provável de que aconteça tal fenômeno.

Com base nos mapas de áreas inundadas relacionados aos diversos períodos de recorrência, os resultados indicam que várias regiões urbanas foram classificadas como propensas a inundações em todos os tempos de retorno. A análise dos dados gerados pelos modelos revelou uma correlação significativa entre as variáveis hidráulicas e hidrológicas estudadas e a ocorrência de inundações na área urbana. O mapeamento detalhado da área alagada proporcionou uma visão clara dos pontos críticos, indicando locais onde a interdição de vias e a evacuação de moradores são imprescindíveis para minimizar os impactos negativos.

Além disso, a determinação do tempo de retorno mínimo para que a inundação atinja cada região da cidade permite estabelecer diretrizes temporais para a implementação de medidas preventivas.

Sendo assim, os resultados obtidos durante a execução da pesquisa sustentam a hipótese, evidenciando a eficácia desses modelos para a tomada de decisões relacionadas à gestão de eventos de inundação na BHISF.

8 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo construir um modelo hidrológico e hidráulico para simular a inundação na BHISF nos tempos de retorno de 05, 10, 25, 50 e 100 anos para encontrar as possíveis áreas atingidas.

A análise do modelo hidrológico evidenciou vazões de pico na Bacia de Contribuição Principal, registrando 467,9 m³/s para o período de retorno de 5 anos e 1034,3 m³/s para o período de retorno de 100 anos. Na BHIF, observaram-se vazões de pico de 22,0 m³/s para o tempo de retorno de 5 anos e 38,5 m³/s para o tempo de retorno de 100 anos. Destaca-se que não existem estações fluviométricas ao longo do ISF, por isso não há dados de vazão e consequentemente o modelo hidrológico não foi calibrado utilizando medições de vazão.

A partir dos hidrogramas obtidos na modelagem hidrológica a modelagem hidráulica resultou nas áreas inundadas de 2,441, 2,6977, 2,9365, 3,0612 e 3,2102 km² para os tempos de retorno de 05, 10, 25, 50 e 100 anos, respectivamente. Tanto o modelo hidrológico quanto o modelo hidráulico foram calibrados por meio das cotas e mancha de inundação do evento de março de 2023, que para a mesma área resultou em 3,0093 km² de área inundada.

Em suma, é possível concluir que as regiões próximas as margens do Igarapé São Francisco são suscetíveis a inundações, a região impactada compreende os Bairros Vila Ivonete, Raimundo Melo, Conquista e Bosque. Adicionalmente os Bairros Baixa da Colina, Casa Nova, Jardim Tropical e Adalberto Aragão além de sofrerem os efeitos da inundação do ISF, também estão suscetíveis aos efeitos das inundações do Rio Acre. Com base nos resultados obtidos através da metodologia proposta há transbordamento da calha do rio para vazões associadas a todos os tempos de retorno simulados.

Conclui-se, portanto, que a utilização desses modelos pode oferecer uma base sólida para um planejamento eficaz e uma resposta rápida diante de eventos de inundação na região urbana de Rio Branco.

9 REFERÊNCIAS

- ABREU, F. G.; SOBRINHA, L. A.; BRANDÃO, J. L. B.. Análise da distribuição temporal das chuvas em eventos hidrológicos extremos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 22, p. 239-250, 2017. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/esa/a/yXk5sJQYZNF6LgxTfZRDKwc/abstract/?lang=pt>> Acesso em: 15/06/2022.
- ACRE. Governo do Estado do Acre, 2010. **Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Acre, Fase II** (Escala 1:250.000) [online]: Documento Síntese. 2 ed. Rio Branco: SEMA. Disponível: <http://www.amazonia.cnptia.embrapa.br/publicacoes_estados/Acre/Fase%202/Documento_Sintese.pdf>. Acesso em 06/02/2022.
- ACRE. Secretaria de Estado de Meio Ambiente. **Plano estadual de recursos hídricos do Acre** – Rio Branco: SEMA, 2012. Disponível em: https://imc.ac.gov.br/wp-content/uploads/2016/09/Plano_Estadual_Recursos_Hidricos.pdf Acesso em 06/02/2022.
- AIRBUS. Copernicus DEM: Copernicus digital elevation model product handbook. **Report AO/1-9422/18/IL G**, 2020. Disponível em: <https://spacedata.copernicus.eu/documents/20123/122407/GEO1988-CopernicusDEM-SPE-002_ProductHandbook_I5.0+/%281%29.pdf/706ee17d-2cce-f1fa-a73e-1686d28f09dd?t=1679657087883> Acesso em: 15/11/2023.
- ALIPOUR, Atieh; JAFARZADEGAN, Keighobad; MORADKHANI, Hamid. Global sensitivity analysis in hydrodynamic modeling and flood inundation mapping. **Environmental Modelling & Software**, v. 152, p. 105398, 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105398>
- ALVES, Fabio Corrêa; VALERIANO, Márcio de Morisson. Avaliação de MDEs de Resolução Espacial Moderada no Norte da Amazônia. In: Anais do XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2023, Florianópolis. Anais eletrônicos... São José dos Campos: INPE, 2023. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2023/trabalhos/avaliacao-de-mdes-de-resolucao-espacial-moderada-no-norte-da-amazonia?lang=pt-br>. Acesso em: 09 dez. 2023.
- ALVES, J. M. de P.; CASTRO, P. T. A.; LANA, C. E. Análise morfométrica da bacia do Rio do Tanque, MG - BRASIL. **REM: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 54, n. 2, p. 121-126, 2001. <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672001000200008>
- ALVES, J.M.P; CASTRO, P.T.A. Influência de feições geológicas na morfologia da bacia do rio do Tanque (MG) baseada no estudo de parâmetros morfométricos e análises de padrões de lineamentos. **Rev. Brasileira de Geociências**, p. 117-1245, jun. 2003. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/4117>> Acesso em 07/06/2022
- ALVES, Josélia da Silva. **Vulnerabilidade Socioambiental no Estado do Acre: riscos sociais e ambientais na Micro Bacia Hidrográfica do Igarapé Fundo**. V Encontro Nacional da Anppas, v. 4, 2014.
- ALVES, Josélia da Silva. **Vulnerabilidade Socioambiental no Estado do Acre: riscos sociais e ambientais na Micro Bacia Hidrográfica do Igarapé Fundo**. V Encontro Nacional da Anppas, v. 4, 2014

AMARAL, A. Em 52 anos de monitoramento, Rio Branco registrou mais de 40 enchentes. G1 Acre, 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/ac/acre/noticia/2023/04/01/em-52-anos-de-monitoramento-rio-branco-registrou-mais-de-40-enchentes.ghtml>. Acesso em: 27 ago. 2023.

AMORIM, T. X.; SENNA, M. C. A.; CATALDI, M. IMPACTOS DO DESMATAMENTO PROGRESSIVO DA AMAZÔNIA NA PRECIPITAÇÃO DO BRASIL. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, 9 maio 2019. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/download/58303/38524>> Acesso em 11/11/2022.

ANDRADE, Gerson Bessa *et al.* ANÁLISE ESPAÇO TEMPORAL DAS ALTERAÇÕES DE USO E COBERTURA DA TERRA NA BACIA DO IGARAPÉ SÃO FRANCISCO, RIO BRANCO–ACRE–BRASIL (2001–2021). **UÁQUIRI-Revista do Programa de Pós Graduação em Geografia da Universidade Federal do Acre**, v. 4, n. 2, 2022. Disponível em: <<https://periodicos.ufac.br/index.php/Uaquiri/article/view/6291>>. Acesso em 15/11/2023.

ARABELOS, D. Intercomparisons of the global DTMsETOPO5, Terrain Base and JGP95E. **Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy**, v. 25, n. 1, p. 89–93, 2000. [https://doi.org/10.1016/S1464-1895\(00\)00015-6](https://doi.org/10.1016/S1464-1895(00)00015-6).

BACHMANN, Markus *et al.* The TanDEM-X mission phases—Ten years of bistatic acquisition and formation planning. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 14, p. 3504-3518, 2021. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9377712>> Acesso em: 15/11/2023.

BAEK, Hee-Jeong *et al.* Climate change in the 21st century simulated by HadGEM2-AO under representative concentration pathways. **Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences**, v. 49, p. 603-618, 2013. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s13143-013-0053-7>> Acesso em 29/11/2023

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E.M. (org.). **Inundações urbanas na América do Sul. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos**, 2003. Disponível em: <<http://www.cepal.org/samtac/noticias/documentosdetrabajo/5/23335/inbr02803.pdf>> Acesso em: 12/05/2022.

BORNSTEIN, Robert; LIN, Qinglu. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies. **Atmospheric Environment**, v. 34, n. 3, p. 507-516, 2000. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00374-X](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00374-X)

BRANDÃO, R. V.; ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A. **A modelagem científica vista como um campo conceitual** DOI: 10.5007/2175-7941.2011v28n3p507. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 28, n. 3, p. 507–545, 15 dez. 2011.

BRASIL. Decreto nº 4.297, de 10 de julho de 2002. Regulamenta o artigo 9, inciso II, da Lei 6.938, de 31 de agosto de 1981, estabelecendo critérios para o Zoneamento Ecológico-Econômico do Brasil - ZEE, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 11 jul. 2002, p. 6, col. 2. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/d4297.htm>. Acesso em 09/09/2023.

BRATTON, Allison. **A comparison of 1D and 2D HEC-RAS models of the napa river through the city of St. Helena, California.** 2017. Tese de Doutorado. California State University, Sacramento. Disponível em: <<https://scholars.csus.edu/esploro/outputs/graduate/A-comparison-of-1D-and-2D/99257831153901671#file-0>> acesso em 13/11/2023.

BRUNNER, Gary W. HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual, Version 6.0. **US Army Corps of Engineers–Hydrologic Engineering Center**, v. 520, 2020. Disponível em: <<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/ras1dtechref/latest/front-matter>> Acesso em 29/11/2023

BRUNO, L. DE S. Impactos econômicos e sociais de inundações em bacia hidrográfica urbana. Fundação Universidade Federal De Mato Grosso Do Sul Programa De Pós-Graduação Em Tecnologias Ambientais. 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufms.br/handle/123456789/4072>> Acesso 11/11/2022

BÜCHELE, B. *et al.* Flood-risk mapping: contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 6, n. 4, p. 485-503, <https://doi.org/10.5194/nhess-6-485-2006>, 2006.

CASTRO, Antônio Luiz Coimbra de. **Glossário de defesa civil estudos de riscos e medicina de desastres**. 2^a Edição. Ministério do Planejamento e Orçamento, Secretaria Especial de Políticas Regionais, Departamento de Defesa Civil, 1998. Disponível em: <<https://www.defesacivil.se.gov.br/wp-content/uploads/2018/04/glossario.pdf>> Acesso em 20/08/2023.

CHRISTOFOLLETTI, A. Análise morfométrica de bacias hidrográficas. Notícia Geomorfológica, v. 18, n. 9, p. 35-64, 1969.

CHRISTOFOLLETTI, A. (1980). **Geomorfologia**. 2 ed., São Paulo, SP: Edgard Blucher. 188 p.

CHRISTOFOLLETTI, Antônio. Aplicabilidade do Conhecimento Geomorfológico nos Projetos de Planejamento. In: **Geomorfologia: Uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 415-441. 1994.

CHRISTOFOLLETTI, A. Modelagem de sistemas ambientais. São Paulo: Edgard Blucher, 1999.

COLLINS, J. *et al.* Applying terrain and hydrological editing to TanDEM-X data to create a consumer-ready WorldDEM product. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 40, p. 1149-1154, 2015. Disponível em: <<https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XL-7-W3/1149/2015/isprarchives-XL-7-W3-1149-2015.pdf>> Acesso em: 15/11/2023.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. Hidrologia: para engenharia e ciências ambientais. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013. 336p. (Coleção ABRH; 12).

CONSELHO NACIONAL DE MUNICÍPIOS (CNM). Estudo Técnico. Brasília/DF, 26 de julho de 2023. Área: Planejamento Territorial e Habitação e Defesa Civil. Título: Desastres obrigam mais de 4,2 milhões de pessoas que foram negligenciadas pelas políticas públicas a buscarem alternativas de moradia nos últimos dez anos.

Brasília/DF, 2023. Disponível em: https://cnm.org.br/storage/noticias/2023/Links/27072023_Estudo_Habita%C3%A7%C3%A3o_Desastre_revisado_area_publica%C3%A7%C3%A3o.pdf, Acessados em 9 de set. De 2023.

COOK, Aaron Christopher. Comparison of one-dimensional HEC-RAS with two-dimensional FESWMS model in flood inundation mapping. **Graduate School, Purdue University, West Lafayette**, 2008. Disponível em: <https://web.ics.purdue.edu/~vmerwade/reports/2008_02.pdf> Acesso em 15/11/2023.

COSTA JUNIOR, J. R. C. Como criar um Hidrograma Unitário Sintético? – Sobre Águas. 2022. Disponível em: <<https://sobreasaguas.com/2022/05/04/como-criar-um-hidrograma-unitario-sintetico/>> Acesso em: 15/06/2022.

COSTA JUNIOR, J. R. C. Como criar um Hidrograma Unitário Sintético? – Sobre Águas. 2022. Disponível em: <<https://sobreasaguas.com/2022/05/04/como-criar-um-hidrograma-unitario-sintetico/>> Acesso em: 15/06/2022.

COSTA, Djeson Mateus Alves da; BARROS JÚNIOR, Antônio Carlos de. AVALIAÇÃO DA NECESSIDADE DO REÚSO DE ÁGUAS RESIDUAIS. **HOLOS**, [S. I.], v. 2, p. 81–101, 2007. DOI: 10.15628/holos.2005.74. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/74>. Acesso em: 30 nov. 2023.

CRED/UNISDR. The human cost of weather related disasters 1995–2015. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, UN Office for Disaster Risk Reduction. 2015.

CREMON, Édipo Henrique *et al.* Avaliação da altimetria do MDE COP-30 no Centro-Oeste do Brasil. **Rev. Bras. Cartografia**, v. 74, n. 3, 2022. Disponível em: <<https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/download/60846/34577>> Acesso em 16/11/2023

DASALLAS, Lea; KIM, Yeonsu; AN, Hyunuk. Case study of HEC-RAS 1D–2D coupling simulation: 2002 Baeksan flood event in Korea. **Water**, v. 11, n. 10, p. 2048, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11102048>

DECINA, T. G. T. **Análise de medidas de controle de inundações a partir da avaliação de cenários de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório**, São Carlos - SP. 2012. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2012. doi:10.11606/D.18.2012.tde-30082012-111216. Acesso em: 2022-03-12.

DECINA, T. G. T.; BRANDÃO, J. L. B. Análise de desempenho de medidas estruturais e não estruturais de controle de inundações em uma bacia urbana. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 1, p. 207–217, mar. 2016. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220201600100116134>.

DIMITRIADIS, Panayiotis *et al.* Comparative evaluation of 1D and quasi-2D hydraulic models based on benchmark and real-world applications for uncertainty assessment in flood mapping. **Journal of Hydrology**, v. 534, p. 478-492, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.020>

DOOGE, J. C. I. Linear Theory Of Hydrologic Systems—Technical Bulletin No. 1468. **US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Washington, DC,** 1973. Disponível em: <https://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/AGU/31ea296c-2c70-4dad-92ef-c4681bc6a288/UploadedImages/Dooge_LinearTheoryHydrology.pdf> Acesso em 15/11/2023.

FONSECA NETO, G. C. et al. Modelagem Bidimensional para a Verificação Hidráulica da Canalização de um Trecho do Rio Fragoso em Olinda (Pernambuco, Brasil). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 6, p. 2963-2977, 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Marcos-Silva-Junior/publication/347438377_Modelagem_Bidimensional_para_a_Verificacao_Hidraulica_da_Canalizacao_de_um_Trecho_do_Rio_Fragoso_em_Olinda_Pernambuco_Brasil/links/5fdb871e92851c13fe93157a/Modelagem-Bidimensional-para-a-Verificacao-Hidraulica-da-Canalizacao-de-um-Trecho-do-Rio-Fragoso-em-Olinda-Pernambuco-Brasil.pdf> Acesso em 15/12/2022

FRAGOSO JR, C. R. Regionalização da vazão máxima instantânea com base na precipitação de projeto. **ReRH: Revista Eletrônica de Recursos Hídricos, IPH/UFRGS, Porto Alegre**, v. 1, p. 5-13, 2004.

FUNDAÇÃO CECIERJ. D'OLIVEIRA, A; et al. Processos físicos do ciclo hidrológico - **Canal CECIERJ**. Disponível em: <<https://canal.cecierj.edu.br/recurso/8109>>. Acesso em: 22 jan. 2023, il.

GAILE, G. L.; WILLMOTT, C. J. (Ed.). **Geography in America at the Dawn of the 21st Century**. Oxford University Press on Demand, 2004.

GARCIA, F. R.; ALIXANDRINI JÚNIOR, M. J. Comparação de MDTs a partir do acoplamento de modelo hidrológico e hidrodinâmico aplicado à identificação de áreas de inundações urbanas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 2, p. 783, 21 abr. 2022. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/250774>> Acesso 11/11/2022

GATWAZA, O. C.; CAO, X.; BECKLINE, M. Impact of Urbanization on the Hydrological Cycle of Migina Catchment, Rwanda. **OALib**, v. 03, n. 07, p. 1–12, 2016. Disponível em: <https://www.scirp.org/html/69517_69517.htm> Acesso em 12/12/2022.

GENOVEZ, Abel Maia. Capítulo 3 - Vazões máximas. In: PAIVA, JBD De; PAIVA, E. M. C. D. Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre: ABRH, 2001. p. 33-112.

GHIMIRE, Ekraj; SHARMA, Suresh. Flood damage assessment in HAZUS using various resolution of data and one-dimensional and two-dimensional HEC-RAS depth grids. **Natural Hazards Review**, v. 22, n. 1, p. 04020054, 2021. Doi [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000430](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000430)

GOMES, W. W. E.; LEITE-FILHO, A. T.; SOARES-FILHO, B. S. SIMULAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS NA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA DA BÁCIA AMAZÔNICA BRASILEIRA. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, 28 abr. 2021 DOI:<http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v28i0.74406>.

- GROHMAN, C. H. Evaluation of TanDEM-X DEMs on selected Brazilian sites: Comparison with SRTM, ASTER GDEM and ALOS AW3D30. **Remote Sensing of Environment**, v. 212, p. 121–133, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.043>.
- HID, A. R. **Monitoramento da expansão urbana e ocupação predial às margens do igarapé São Francisco em Rio Branco-Acre.** 2000 Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Disponível em <<http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/78730>> Acesso em 15/05/2022.
- HUFF, F. A. Time distribution of rainfall in heavy storms. **Water resources research**, v. 3, n. 4, p. 1007-1019, 1967. <https://doi.org/10.1029/WR003i004p01007>
- HUNTINGTON, T. G. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. **Journal of Hydrology**, v. 319, n. 1–4, p. 83–95, mar. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.003>.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Brasileiro de 2022. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <<https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>>. Acesso em: 05/11/2023.
- IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Trabalho e Rendimento, Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios 2015. Disponível em <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/educacao/9127-pesquisa-nacional-por-amostra-de-domicilios.html>> Acesso em 16/11/2022
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html?caminho=cartas_e_mapas/bases_cartograficas_continuas/bc250/versao2021/> Acesso em: 07 jun. 2022.
- INNOCENTE, Camyla *et al.* Um estudo sobre a definição da duração crítica da chuva de projeto na bacia da UFSC, Florianópolis-SC. **Encontro Nacional de Desastres (1., jul. 2018, Porto Alegre). Anais. Porto Alegre: ABRHidro,[2018].**, 2018. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/185106/001080029.pdf?sequence=1>>. Acesso em 17/10/2023
- JARES, Melissa. Prefeitura lança operação de limpeza do leito e das margens do Igarapé São Francisco. Assecom, PMRB, 28 jul. 2023. Disponível em: <https://www.riobranco.ac.gov.br/?p=93145>. Acesso em: 23/10/2023.
- KAISER, Ilza Machado. **Avaliação de métodos de composição de campos de precipitação para uso em modelos hidrológicos distribuídos.** 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-17042006-222747/publico/3-Modelos.pdf>> Acesso em 05/10/2023
- KALRA, Ajay *et al.* Coupled 1D and 2D HEC-RAS Floodplain Modeling of Pecos River in New Mexico. In: **World Environmental and Water Resources Congress 2021.** 2020. p. 165-178. ISBN (PDF):9780784483466 <https://doi.org/10.1061/9780784483466>
- KANASHIRO, W. H. Curso Segurança de Barragens: Modulo I–Barragens: Aspectos Legais, Técnicos e Socioambientais, Unidade 6: Noções de Hidráulica. 2011.

KNEBL, M. R. et al. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. **Journal of Environmental Management**, v. 75, n. 4, p. 325-336, 2005. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479705000228>> Acesso em 24/03/2022.

MALHEIROS, C. et al. Mapeamento das áreas de inundação de uma área urbana na bacia hidrográfica do rio águas vermelhas com ênfase do sistema viário local. **II Encontro Nacional de Desastres**. p. 4, 2020. Disponível em: <<https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/133/II-END0061-1-20201014-170301.pdf>> Acesso em 30/08/2022.

MANSANO, A.; SERRANO, R. A nova geografia e a aplicação de modelos científicos hidrológicos e hidráulicos. In: Tópicos Especiais em Engenharia: Inovações e Avanços Tecnológicos 8. [S.I.: s.n.], 2023. p. 42–56. DOI: 10.47573/aya.5379.2.231.4.

MANSANO, A.; SERRANO, R. Mapeamento da área de inundação da bacia do Igarapé São Francisco – AC em março de 2023 no contexto Agenda 2030. **Revista de Tecnologia & Gestão Sustentável**, v. 2, nov. 2023. DOI:[10.17271/rtgs.v2i6.4315](https://doi.org/10.17271/rtgs.v2i6.4315)
MAREŠOVÁ, J. et al. Aplicabilidade das Características de Aquisição de Dados na Identificação de Artefatos Locais em Modelos Digitais de Elevação Globais: Comparação dos MDEs Copernicus e TanDEM-X. **Remote Sensing**, v. 13, n. 20, artigo 3931, 2021. DOI: 10.3390/rs13193931.

MENDES, Heloisa Ceccato; MENDIONDO, Eduardo Mario. Histórico da expansão urbana e incidência de inundações: o caso da Bacia do Gregório, São Carlos-SP. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 1, p. 17-27, 2007. Disponível em: <https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/21/8929ab216c275c4e6f0c83e08e1e2fbb_239069120256863bc9bc6df8ae5bcd86.pdf> Acesso em 10/12/2022.

MENDONÇA, Leonardo Melo de et al. Modelagem chuva-vazão via redes neurais artificiais para simulação de vazões de uma bacia hidrográfica da Amazônia. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 18, n. 2021, 2021. Disponível em: <<https://www.abrh.org.br/OJS/index.php/REGA/article/view/502>> Acesso em 30/08/2023.

MILLY, P. C. D.; SHMAKIN, A. B. Global modeling of land water and energy balances. Part I: The land dynamics (LaD) model. **Journal of Hydrometeorology**, v. 3, n. 3, p. 283-299, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2002\)003<0283:GMOLWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2002)003<0283:GMOLWA>2.0.CO;2).

MONTE, Benício Emanoel Omena et al. Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada ao mapeamento de áreas inundáveis. **RBRH**, v. 21, p. 152-167, 2016. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbrh/a/S96LJwXfz7GKqDGjxTK84rJ/?lang=pt>>. Acesso em: 23/10/2023.

NAMARA, W. G.; DAMISSE, T. A.; TUFA, F. G. Application of HEC-RAS and HEC-GeoRAS model for Flood Inundation Mapping, the case of Awash Bello Flood Plain, Upper Awash River Basin, Oromiya Regional State, Ethiopia. **Modeling Earth Systems and Environment**, 8, 1449–1460 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01166-9>.

NASCIMENTO, F. I. C. et al. Caracterização Morfométrica como Base para o Manejo da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco–Acre. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 6, n. 02, p. 170-183, 2013. Disponível em <<https://www.academia.edu/download/90024542/26866.pdf>> Acesso em 06/02/2022.

NETO, Alfredo Ribeiro et al. Caracterização da formação de cheias na bacia do rio Una em Pernambuco: simulação hidrológica-hidrodinâmica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 2, p. 394-403, 2015. Disponível em: <<https://biblat.unam.mx/hevila/RBRHRevistabrasileiraderecursoshidricos/2015/vol20/no2/11.pdf>>. Acesso em: 05/11/2023.

OLIVEIRA, A. K. B. et al., O Papel da Concepção de Espaços Livres no Planejamento da Paisagem, Com Foco na Drenagem Urbana e Controle de Inundações: Um Estudo de Caso para a Cidade Dos Meninos em Duque de Caxias/RJ. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2017. Disponível em <<http://abrh.s3.amazonaws.com/Eventos/Trabalhos/60/PAP022449.pdf>> acesso em 13/12/2022

OLIVEIRA, A. V. et al. Tendência Temporal e Estimativa do Risco Hidrológico de Extremos Máximos de Chuva e de Vazão na Cidade de Rio Branco, Acre, Brasil. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 36, p. 749-758, 2022. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbmet/a/hTtq3SLPWQHrpFDGrK9Lwbr/abstract/?lang=pt>> Acesso em: 28/07/2023.

OLIVEIRA, J. A. A cultura, as cidades e os rios na Amazônia. **Cienc. Cult.**, São Paulo, v. 58, n. 3, p. 27-29, Set. 2006. ISSN 0009-6725. Disponível em: <http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252006000300013&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 09 jan. 2023.

OMM (Organización Meteorológica Mundial). Atlas de la OMM sobre mortalidad y pérdidas económicas debidas a fenómenos meteorológicos, climáticos e hidrológicos extremos (1970–2019). Genève, Suiza, 90 p., 2021. Disponível em: <https://library.wmo.int/viewer/28270/download?file=1267_Atlas_of_Mortality_es.pdf&type=pdf>, Acessado em 9 de set. De 2023.

PINTO, R. Conceito de Bacia Hidrográfica – S.O.S Rio Paiva – 29 jul. 2019 Disponível em: <<https://www.riopaiva.org/conceito-de-bacia-hidrografica/>>. Acesso em: 22 jan. 2023, il.

PISTOCCHI, A.; MAZZOLI, P. Use of HEC-RAS and HEC-HMS models with ArcView for hydrologic risk management. International Congress on Environmental Modelling and Software. 138. 2002. Disponível em <<https://scholarsarchive.byu.edu/iemssconference/2002/all/138>> Acesso em 22/10/2023.

PMRB – Prefeitura Municipal de Rio Branco (2013) Sistema Urbano de Inteligência Territorial. Rio Branco, Acre

PONCE, Victor M.; HAWKINS, Richard H. Runoff curve number: Has it reached maturity?. **Journal of hydrologic engineering**, v. 1, n. 1, p. 11-19, 1996. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1996\)1:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1996)1:1(11))

PORTO, Rodrigo de Melo. Hidráulica Básica. 2a. Ed. São Carlos, EESC-USP, 1998.

PURINTON, Benjamin; BOOKHAGEN, Bodo. Beyond vertical point accuracy: Assessing inter-pixel consistency in 30 m global DEMs for the arid Central Andes. **Frontiers in Earth Science**, v. 9, p. 758606, 2021. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.758606>. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2021.758606/full>> Acesso em: 15/11/2023.

QIN, Y. A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 445–459, dez. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.177>.

RAMANATHAN, V. C. P. J. et al. Aerosols, climate, and the hydrological cycle. **science**, v. 294, n. 5549, p. 2119-2124, 2001. DOI: 10.1126/science.1064034.

REIS, Mateus da Silva; OLIVEIRA, Guilherme Garcia de; ANDRADES-FILHO, Clódis de Oliveira. Avaliação altimétrica dos modelos digitais de elevação ALOS World 3D30, Copernicus DEM e NASADEM para estudos geomorfológicos na Formação Tupanciretã, Rio Grande do Sul. In: Anais do XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2023, Florianópolis. Anais eletrônicos... São José dos Campos: INPE, 2023. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2023/trabalhos/avaliacao-altimetrica-dos-modelos-digitais-de-elevacao-alos-world-3d30-copernicu?lang=pt-br>. Acesso em: 09 dez. 2023.

REZENDE, G. B. M.. **Modelo hidrológico e hidráulico para estimativa e delimitação de áreas inundadas: uma ferramenta de auxílio a elaboração de Planos Diretores de Drenagem Urbana**. Dissertação (mestrado), programa de pós-graduação em engenharia civil – Universidade Federal de Uberlândia (2011). <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2012.43>. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14165>> Acesso em 24/03/2022.

RIZZOLI, Paola et al. Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 132, p. 119-139, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092427161730093X>> Acesso em: 15/11/2023.

RODRIGUES, T. E. et al. Caracterização e classificação dos solos do Pólo Acre I. Área de Rio Branco, Estado do Acre. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2003. 64 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 153) — 2003. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/408035>>. Acesso em 15/09/2023.

SALATI, E.; NOBRE, C. A. Possible climatic impacts of tropical deforestation. **Climatic Change**, v. 19, n. 1, p. 177–196, 1 set. 1991.

SANTOS, G. L. P. **As enchentes no município de rio branco: atuação da coordenadoria municipal de defesa civil sob a ótica da gestão de risco e da administração de desastres**. Florianópolis-SC 2006. Disponível em <https://www.ceped.ufsc.br/wp-content/uploads/2014/09/monografia_George.pdf> Acesso em 20/03/2022.

SANTOS, Irani dos Santos et al. Hidrometria aplicada. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2001

SARTORI, Aderson. **Avaliação da classificação hidrológica do solo para a determinação do excesso de chuva do método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos**. 2004. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas. Disponível em: <<https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=466016>> Acesso em: 30/08/2023.

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. 05-18, 2005. Disponível em: <https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/26/6c2ebe52f7043b800f2879be8e09bd55_624e887e937b744607e1fe0d08b69e6d.pdf> Acesso em: 30/08/2023

SHANKAR, C. P. et al. Flood modeling for a part of Adyar river basin using HEC-HMS and HEC-RAS for the December 2015 floods. **Ecology, Environment and Conservation**, p. 5, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Pradeep-Chandrabose/publication/327338066_Flood_modeling_for_a_part_of_Adyar_river_basin_using_HEC-HMS_and_HEC-RAS_for_the_December_2015_floods/links/5b8d8a7992851c6b7eba794d/Flood-modeling-for-a-part-of-Adyar-river-basin-using-HEC-HMS-and-HEC-RAS-for-the-December-2015-floods.pdf> Acesso em 24/03/2022.

SHARKEY, Jennifer Kay. Investigating instabilities with HEC-RAS unsteady flow modeling for regulated rivers at low flow stages. 2014. Disponível em: https://trace.tennessee.edu/utk_gradthes/3183/. Acesso em: 09 set. 2023.

SILVA, L. S.; FRANÇA, C. A. S. SIG como ferramenta de mapeamento das formas de uso e ocupação do solo na APA Igarapé São Francisco, Rio Branco, Acre. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 16, 2013. Disponível em: <<http://marte2.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte2/2013/05.29.00.33.06/doc/p1200.pdf>> Acesso em 01/12/2022.

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. Rbrh: revista brasileira de recursos hídricos. Porto Alegre, RS: ABRH. Vol. 10, n. 1 (jan./mar. 2005). p. 5-23, 2005. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/231244>> Acesso em 25/08/2022

SNYDER, K. A. et al. Effects of Changing Climate on the Hydrological Cycle in Cold Desert Ecosystems of the Great Basin and Columbia Plateau. **Rangeland Ecology & Management**, v. 72, n. 1, p. 1–12, jan. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2018.07.007>

SONG, X.; KONG, F.; ZHU, Z. Application of Muskingum routing method with variable parameters in ungauged basin. **Water Science and Engineering**, v. 4, n. 1, p. 1-12, 2011. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2011.01.001>

STEINMETZ, Alice Alonso et al. Influência da discretização espacial na modelagem de cheia utilizando a teoria do hidrograma unitário. **RBRH**, v. 24, 2019. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbrh/a/PgfGpQ7mqFCF8JTMM7pJRnr/abstract/?lang=pt>> Acesso em 20/10/2023.

SURWASE, Tushar *et al.* Flood inundation simulation of Mahanadi River, Odisha during September 2008 by using HEC-RAS 2D model. In: **Proceedings of International Conference on Remote Sensing for Disaster Management: Issues and Challenges in Disaster Management**. Springer International Publishing, 2019. p. 851-863. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77276-9_77

SYNNEFA, A. *et al.* On the use of cool materials as a heat island mitigation strategy. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 47, n. 11, p. 2846-2856, 2008. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1830.1>.

TAMWING, Daniela Silva *et al.* Caracterização do regime fluvial da bacia hidrográfica do rio Acre. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 17, p. e93101724461-e93101724461, 2021. Disponível em <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/24461>> Acesso em 20/06/2022.

TENG, Jin *et al.* Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. **Environmental modelling & software**, v. 90, p. 201-216, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006>

THAKUR, B. *et al.* **Coupling HEC-RAS and HEC-HMS in Precipitation Runoff Modelling and Evaluating Flood Plain Inundation Map**. World Environmental and Water Resources Congress 2017. **Anais...** In: WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS 2017. Sacramento, California: American Society of Civil Engineers, 18 maio 2017. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784480625.022>>. Acesso em: 16/01/2022.

TUCCI, C. E. M. 1997. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2.ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS, 1997. (Col. ABRH de Recursos Hídricos, v.4).

TUCCI, C. E. M. Drenagem urbana. **Ciência e cultura**, v. 55, n. 4, p. 36-37, 2003. Disponível em:<http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s0009-67252003000400020> em 13/03/2022.

TUCCI, C. E. M. Gerenciamento da drenagem urbana. **Rbrh: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, RS. Vol. 7, n. 1 (2002 jan./mar.), p. 5-27, 2002. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/231957>> acesso em 13/03/2022.

TUCCI, Carlos EM *et al.* Inundações urbanas. Porto Alegre: ABRH/Rhama, v. 11, 2007. Disponível em: <http://www.mpf.mp.br/atuacao-tematica/CCR4/importacao/institucional/grupos-de-trabalho/encerrados/residuos/documentos-diversos/outros_documentos_tecnicos/curso-gestao-do-territorio-e-manejo-integrado-das-aguas-urbanas/drenagem1.PDF> em 13/03/2022.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE), Hydrologic Engineering Center. 2010. **HEC-RAS River Analysis System, User's Manual**, Version 4.1, CPD-68. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. Disponível em: <<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf>> acesso em 07/01/2022.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE), Hydrologic Engineering Center 2013. **HEC-HMS Hydrologic Modeling System**, User's Manual, Version 4.0, CPD-74A. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. Disponível em: <

https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Users_Manual_4.0.pdf acesso em 07/01/2022.

USACE, Hydrologic Engineering Center, Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual, march 2000.
[https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical%20Reference%20Manual_\(CPD-74B\).pdf](https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical%20Reference%20Manual_(CPD-74B).pdf)

VIEIRA, Rafaela; ISENSEE, Leandro José; DE OLIVEIRA CLAUDINO, Gilson. Instrumentos legais como ferramentas para redução de riscos e desastres a inundações. **Redes. Revista do Desenvolvimento Regional**, v. 25, p. 1953-1972, 2020. DOI: 10.17058/redes.v25i4.13989 Disponíveis em <<https://www.redalyc.org/journal/5520/552068329021/552068329021.pdf>>. Acesso em 10/11/2023.

VON BERTALANFFY, Ludwig. General System Theory-A Critical Review, «General Systems», vol. VII, n. C, 1962.

WWF, Rio Branco registra a maior cheia dos últimos 132 anos. 2015. Disponível em: <<https://www.wwf.org.br/?43902/Rio-Branco-registra-a-maior-cheia-dos-Itimos-132-anos>>. Acesso em: 20/03/2022.

YAMAMOTO, Yoshika. Measures to mitigate urban heat islands. NISTEP Science & Technology Foresight Center, 2006. <<https://coolrooftoolkit.org/wp-content/uploads/2012/04/Measures-to-Mitigate-UHI-Yamamoto.pdf>> Acesso 26/09/2022

YANG, L et al. Research on urban heat-island effect. Procedia engineering, v. 169, p. 11-18, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.002>.

YANG, D.; YANG, Y.; XIA, J. Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review. **Geography and Sustainability**, v. 2, n. 2, p. 115-122, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.05.003>.

ZHANG, H. et al. Using an improved SWAT model to simulate hydrological responses to land use change: A case study of a catchment in tropical Australia. Journal of Hydrology, v. 585, p. 124822, jun. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124822>

ZIN, W. W.; KAWASAKI, A.; WIN, S. River flood inundation mapping in the Bago River Basin, Myanmar. **Hydrological Research Letters**, v. 9, n. 4, p. 97–102, 2015. <https://doi.org/10.3178/hrl.9.97>. Disponível em: < https://www.jstage.jst.go.jp/article/hrl/9/4/9_97/_article> Acesso em 24/03/2022.