



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA,
INOVAÇÃO E TECNOLOGIA PARA A AMAZÔNIA – CITA



**ESTIMAÇÃO DE VAZÕES MÁXIMAS A PARTIR DA
MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O HEC-HMS: ESTUDO
DE CASO NO RIO ACRE, AMAZÔNIA OCIDENTAL**

ORLAN OMAR AGUILAR IRURETA

RIO BRANCO, AC
Setembro/2024

ORLAN OMAR AGUILAR IRURETA

**ESTIMAÇÃO DE VAZÕES MÁXIMAS A PARTIR DA
MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O HEC-HMS: ESTUDO
DE CASO NO RIO ACRE, AMAZÔNIA OCIDENTAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência, Inovação e Tecnologia para a Amazônia, da Universidade Federal do Acre, como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências e Inovação Tecnológica**.

Orientador: Prof. Dr. José Genivaldo do Vale Moreira

Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Otávio Peréa Serrano

RIO BRANCO, AC
Setembro/2024

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da UFAC

I719e Irureta, Orlan Omar Aguilar, 1988 -

Estimação de vazões máximas a partir da modelagem hidrológica com o HEC-HMS: estudo de caso no rio Acre, Amazônia Ocidental / Orlan Omar Aguilar Irureta; orientador: Dr. José Genivaldo do Vale Moreira e Coorientador Dr. Rodrigo Otávio Peréa Serrano. – 2024.
151 f.: il.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Acre, Programa de Pós-Graduação em Ciência, Inovação e Tecnologia para a Amazônia-Cita, Rio Branco, 2024.

Inclui referências bibliográficas e apêndice.

1. Eventos hidrológicos. 2. *Curve Number*. 3. Distribuições teóricas. I. Moreira, José Genivaldo do Vale (orientador). II. Serrano, Rodrigo Otávio Peréa (coorientador). III. Título.

CDD: 509

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA, INOVAÇÃO E TECNOLOGIA
PARA A AMAZÔNIA – CITA

ESTIMAÇÃO DE VAZÕES MÁXIMAS A PARTIR DA MODELAGEM
HIDROLÓGICA COM O HEC-HMS: ESTUDO DE CASO NO RIO
ACRE, AMAZÔNIA OCIDENTAL

ORLAN OMAR AGUILAR IRURETA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 01 de outubro de 2024

PROF. DR. JOSÉ GENIVALDO DO VALE MOREIRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE

PROF. DR. RICARDO RIBEIRO DO NASCIMENTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE

DR. GERBSON FRANCISCO NOGUEIRA MAIA
CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO ACRE

Dedico esta dissertação à minha querida esposa, aos meus filhos e pais, cujo amor, paciência e apoio incondicional foram a base de todas as minhas conquistas. Sem eles, este sonho jamais seria possível.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho representa muito mais do que uma simples dissertação. É o reflexo de um percurso de crescimento pessoal e acadêmico que, sem a paciência e apoio de pessoas especiais na minha vida, jamais teria sido possível.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus e minha família, em especial à minha esposa, Daniela, o meu mais profundo e sincero agradecimento. Não tenho palavras para expressar o quão grato estou pela sua parceria, pela sua paciência nos momentos de ausência, e pela força que me deu quando eu mais precisava. A sua capacidade de me inspirar e me apoiar, mesmo quando os desafios pareciam intransponíveis, é a verdadeira razão pela qual consegui chegar até aqui.

Aos meus queridos filhos, Eduardo, Laura e Lohan, agradeço por serem a minha fortaleza, por cada abraço, sorriso e palavra de encorajamento, que me deram a energia para seguir em frente, mesmo quando parecia tão difícil. Vocês, sem saberem, foram o meu maior combustível. Esta conquista é nossa.

Também preciso expressar a minha mais profunda gratidão aos meus pais, Consuelo e Orlando, que sempre foram os meus maiores exemplos de força, dedicação e amor. Obrigado por cada palavra de encorajamento e por estarem ao meu lado em cada momento, com o seu amor incondicional.

Não posso deixar de reconhecer a importância do meu orientador, Dr. Genivaldo, cuja sabedoria, paciência e confiança foram fundamentais neste caminho. A sua orientação, sempre atenta e generosa, me deu a clareza e o incentivo necessário para transformar minhas ideias dispersas em algo concreto. Agradeço, não só pelo acompanhamento acadêmico, mas pela amizade e incentivo constante, que me permitiram crescer muito além do esperado.

A todos vocês, minha eterna gratidão.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

(Arthur Schopenhauer)

RESUMO

A relação do homem com os cursos d'água enfrenta desafios significativos devido aos impactos dos processos hidrológicos, intensificados pela urbanização desordenada e mudanças climáticas, resultando em um aumento de eventos hidrológicos extremos e frequentes inundações. Este estudo tem como objetivo estimar as vazões máximas da bacia hidrográfica do Rio Acre, utilizando o software HEC-HMS para modelagem hidrológica e integrando imagens de satélite MDE *Copernicus* e dados da Rede Hidrometeorológica Nacional. A metodologia emprega a distribuição temporal de Huff, o método SCS diagrama unitário para a transformação da chuva em vazão e o método Muskingum-Cunge para caracterizar a propagação de vazões. A bacia do Rio Acre, com área de 35.763,3 km², foi dividida em 13 sub-bacias. As características fisiográficas indicam que sub-bacias alongadas e com baixa declividade reduzem o risco de enchentes, enquanto a sinuosidade dos rios atenua picos de cheia. O *Curve Number* (CN) mostrou-se sensível às alterações no uso do solo. As vazões estimadas apresentaram coerência com a distribuição log-normal em Assis Brasil e consistência com as distribuições teóricas em Rio Branco para tempos de retorno de 25, 50 e 100 anos. As vazões máximas incluem 3.031,4 m³/s em Brasileia, 4.086,4 m³/s em Xapuri e 2.682,6 m³/s em Assis Brasil, para um tempo de retorno de 100 anos. Os dados desta dissertação visam apoiar estratégias de gestão hídrica na bacia do Rio Acre. Para futuras pesquisas, recomenda-se aprimorar os dados de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) e realizar estudos mais detalhados das características hidrológicas dos rios amazônicos.

Palavras-chave: Eventos hidrológicos. Eventos extremos. Características fisiográficas. *Curve Number*. Distribuições teóricas.

ABSTRACT

The relationship between humans and watercourses faces significant challenges due to the impacts of hydrological processes, intensified by unplanned urbanization and climate change, resulting in an increase in extreme hydrological events and frequent flooding. This study aims to estimate the maximum flows of the Acre River hydrographic basin, using the HEC-HMS software for hydrological modeling and integrating Copernicus DEM satellite images and data from the National Hydrometeorological Network. The methodology uses the Huff temporal distribution, the SCS unitary diagram method for transforming rainfall into flow and the Muskingum-Cunge method to characterize flow propagation. The Acre River basin, with an area of 35,763.3 km², was divided into 13 sub-basins. Physiographic characteristics indicate that elongated sub-basins with low slope reduce the risk of flooding, while the sinuosity of the rivers attenuates flood peaks. The Curve Number (CN) proved sensitive to changes in land use. The simulated flows were consistent with the log-normal distribution in Assis Brasil and consistent with the theoretical distributions in Rio Branco for return times of 25, 50 and 100 years. Maximum flows include 3,031.4 m³/s in Brasileia, 4,086.4 m³/s in Xapuri and 2,682.6 m³/s in Assis Brasil, for a return time of 100 years. The data in this dissertation aim to support water management strategies in the Acre River basin. For future research, it is recommended to improve the Intensity-Duration-Frequency (IDF) data and carry out more detailed studies of the hydrological characteristics of Amazonian rivers.

Keywords: Hydrological events. Extreme events. Physiographic features. Curve Number. Theoretical distributions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Elementos de uma bacia hidrográfica	24
Figura 2: Ilustração dos fenômenos hidrológicos que ocorrem no ciclo hidrológico	27
Figura 3: Variabilidade temporal da chuva	30
Figura 4: Representação do hidrograma de para um evento de cheia em uma bacia hidrográfica.....	33
Figura 5: Impactos da urbanização no ciclo hidrológico.....	35
Figura 6: Perfil esquemática de uma situação de enchente e inundação	36
Figura 7: Triângulo de risco, proposto por Crichton (1999)	37
Figura 8: Etapas da gestão de risco de inundações.....	39
Figura 9: Histograma de frequência de chuvas anuais para uma estação pluviométrica.	41
Figura 10: Exemplo de Curva de Permanência	41
Figura 11: Exemplo de um hidrograma de Vazões Médias Anuais	42
Figura 12: Identificação de valores máximo anuais de vazão para análise de frequência de vazões máximas.....	42
Figura 13: Pluviometria de diferentes locais da bacia do Rio Acre	43
Figura 14: Regime chuvas na Bacia do Rio Acre.....	44
Figura 15: Ilustração do conceito de tempo de retorno para eventos máximos	45
Figura 16: Termo de retorno de cheia de projeto em função do risco hidrológico e a vida útil estimada para uma estrutura hidráulica	46
Figura 17: Resposta de uma bacia hidrográfica a um evento de chuva de curta duração	53
Figura 18: Princípio da proporcionalidade da teoria do hidrograma unitário	54
Figura 19: Princípio da Constância de Tempo de Base.....	54
Figura 20: Princípio da Independência de Eventos	55
Figura 21: Princípio da Superposição de hidrogramas.....	55
Figura 22: Características do Hidrograma para definição do Hidrograma Unitário Sintético .	56
Figura 23: Exemplo de Hidrograma Unitário Triangular do SCS.....	57
Figura 24: Efeitos da translação e amortecimento durante a propagação de uma onda de cheia de um rio.....	60
Figura 25: (A) Terreno representado por um (B) modelo digital de superfície (MDS) e modelo digital de terreno (MDT) e (C) uma superfície não vegetada (SNV).....	62
Figura 26: Delimitação da área da Bacia Hidrográfica do Rio Acre.....	67

Figura 27: Criando modelo de bacia.....	72
Figura 28: Definindo sistema de coordenadas.....	73
Figura 29: Criando dados de terreno	73
Figura 30: Camada Sink Locations	74
Figura 31: Camada Flow Accumulation.....	74
Figura 32: Detalhe da rede de drenagem	75
Figura 33: Área de drenagem	75
Figura 34: Localização do Exultório	76
Figura 35 : Delineando elementos da bacia.....	76
Figura 36: Divisão inicial da bacia do Rio Acre	77
Figura 37: Split Element da sub-bacia 01.....	77
Figura 38: Cidades e estações fluviométricas da Bacia do Rio Acre	78
Figura 39: Os três mapas Curve Number Global (GCN250). (a) Seco (ARCI), (b) médio (ARCII) e (c) úmido (ARCIII) condições antecedentes de escoamento	82
Figura 40: Tamanho da célula e projeção estruturada.....	83
Figura 41: Discretização estruturada da Bacia do Rio Acre.....	83
Figura 42: Configurando parâmetros de perda.....	84
Figura 43: Expressão da calculadora para o Curve Number	84
Figura 44: Expressão da calculadora para o Initial Abtraction	85
Figura 45: Tempo de pico (lag time) informados no HEC-HMS.....	85
Figura 46: Parâmetros do método Muskingum-Cunge.....	86
Figura 47: Relações globais entre propriedades fluviais. As cores representam o logaritmo do número de ocorrências por compartimento. Painéis mostram (a) largura versus inclinação da superfície d'água, (b) largura versus comprimento de onda do meandro, (c) sinuosidade versus largura, (d) sinuosidade versus inclinação da superfície da água, (e) gráficos de caixa mostrando a faixa de larguras observadas pelas caixas da área de captação ao longo da lei de potência ajustada ($r^2 = 0,25$ calculado como 1 menos a razão entre a variância dos resíduos e a variação das larguras medidas)	87
Figura 48: Meteorologic Models	88
Figura 49: Control Specifications.....	88
Figura 50: Gerenciados de rodadas de simulações	89
Figura 51: Simulations Runs	89
Figura 52: Results.....	89
Figura 53: Sub-bacias e trechos dos rios da Bacia do Rio Acre.....	91

Figura 54: Caminhos mais longo das sub-bacias do Rio Acre	92
Figura 55: Caminhos centroide das sub-bacias do Rio Acre.....	93
Figura 56: Caminhos 10-85 das sub-bacias do Rio Acre	94
Figura 57: Curve Number global (GCN250) da Bacia do Rio Acre, condição antecedente úmido.....	106
Figura 58: Curve Number global (GCN250) da Bacia do Rio Acre, condição antecedente médio	107
Figura 59: Curve Number Global (GCN250) da Bacia do Rio Acre, condição antecedente seco	107
Figura 60: Modelo hidrológico da Bacia do Rio Acre	109
Figura 61: Hietograma e hidrograma da sub-bacia S1	110
Figura 62: Hidrograma da junção J1	111
Figura 63: Hidrograma de entrada e saída do trecho de rio R1	111
Figura 64: Hietograma e hidrograma da sub-bacia S2	112
Figura 65: Hidrograma da junção J2	113
Figura 66: Hidrograma de entrada e saída do trecho de rio R2.....	113
Figura 67: Hietograma e hidrograma da sub-bacia S3	114
Figura 68: Hidrograma da junção J3	114
Figura 69: Hidrograma de entrada e saída do trecho de rio R3.....	115
Figura 70: Hietograma e hidrograma da sub-bacia S4	115
Figura 71: Hietograma e hidrograma da sub-bacia S5	116
Figura 72: Hidrograma da junção J4	116
Figura 73: Hidrograma de entrada e saída do trecho de rio R4.....	117
Figura 74: Hietograma e hidrograma da sub-bacia S6	118
Figura 75: Hidrograma da junção J5	118
Figura 76: Hidrograma de entrada e saída do trecho de rio R5.....	119
Figura 77: Hietograma e hidrograma da sub-bacia S7	119
Figura 78: Hidrograma da junção J6	120
Figura 79: Hidrograma de entrada e saída do trecho de rio R6.....	120
Figura 80: Hietograma e hidrograma da sub-bacia S8	121
Figura 81: Hietograma e hidrograma da sub-bacia S9	121
Figura 82: Hidrograma da junção J7	122
Figura 83: Hidrograma de entrada e saída do trecho de rio R7.....	123

Figura 84: Hietograma e hidrograma da sub-bacia S10	123
Figura 85: Hidrograma da junção J8	124
Figura 86: Hidrograma de entrada e saída do trecho de rio R8.....	124
Figura 87: Hietograma e hidrograma da sub-bacia S11	125
Figura 88: Hietograma e hidrograma da sub-bacia S12	125
Figura 89: Hidrograma da junção J9	126
Figura 90: Hidrograma de entrada e saída do trecho de rio R9.....	126
Figura 91: Hietograma e hidrograma da sub-bacia S13	127
Figura 92: Hidrograma no exutório	127

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classificação de sub-bacias em função da área.....	25
Quadro 2: Principais cotas do Rio Acre em Rio Branco	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Quartis de distribuição de Huff	79
Tabela 2: Parâmetros das IDF	81
Tabela 3: Dados das estações fluviométricas na Bacia do Rio Acre.....	90
Tabela 4: Características fisiográficas das Sub-bacias do Rio Acre (Parte 01)	95
Tabela 5: Características fisiográficas das Sub-bacias do Rio Acre (Parte 02).....	96
Tabela 6: Características fisiográficas dos trechos dos rios	97
Tabela 7: Tempo de concentração e tempo de pico (lag time).....	97
Tabela 8: Curve Number e abstração inicial da Bacia do Rio Acre	108
Tabela 9: Vazões de referência para o método Muskingum-Cunge.....	109
Tabela 10: Vazões máximas das cidades do Rio Acre	128
Tabela 11: Vazões máximas com base nas distribuições para o TR = 100 anos.....	133
Tabela 12: Vazões máximas com base nas distribuições para o TR = 50 anos.....	133
Tabela 13: Vazões máximas com base nas distribuições para o TR = 25 anos.....	134
Tabela 14: Vazões máximas com base nas distribuições para o TR = 5 anos.....	134

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Quartis de distribuição de Huff	80
Gráfico 2: Hietograma de chuva de projeto para sub-bacia 01 com TR = 100 anos.....	99
Gráfico 3: Hietograma de chuva de projeto para sub-bacia 02 com TR = 100 anos.....	99
Gráfico 4: Hietograma de chuva de projeto para sub-bacia 03 com TR = 100 anos.....	100
Gráfico 5: Hietograma de chuva de projeto para sub-bacia 05 com TR = 100 anos.....	100
Gráfico 6: Hietograma de chuva de projeto para sub-bacia 04 com TR = 100 anos.....	101
Gráfico 7: Hietograma de chuva de projeto para sub-bacia 06 com TR = 100 anos.....	101
Gráfico 8: Hietograma de chuva de projeto para sub-bacia 07 com TR = 100 anos.....	102
Gráfico 9: Hietograma de chuva de projeto para sub-bacia 08 com TR = 100 anos.....	103
Gráfico 10: Hietograma de chuva de projeto para sub-bacia 09 com TR = 100 anos.....	103
Gráfico 11: Hietograma de chuva de projeto para sub-bacia 10 com TR = 100 anos.....	104
Gráfico 12: Hietograma de chuva de projeto para sub-bacia 11 com TR = 100 anos.....	104
Gráfico 13: Hietograma de chuva de projeto para sub-bacia 12 com TR = 100 anos.....	105
Gráfico 14: Hietograma de chuva de projeto para sub-bacia 13 com TR = 100 anos.....	105
Gráfico 15: Vazões máximas das cidades do Rio Acre.....	129
Gráfico 16: Distribuição das vazões máximas da estação fluviométrica de Assis Brasil (13450000)	130
Gráfico 17: Distribuição das vazões máximas da estação fluviométrica de Brasília (13470000)	130
Gráfico 18: Distribuição das vazões máximas da estação fluviométrica de Xapuri (13550000)	131
Gráfico 19: Distribuição das vazões máximas da estação fluviométrica de Rio Branco (13600002)	132
Gráfico 20: Distribuição das vazões máximas da estação fluviométrica de Floriano Peixoto (13650000)	132
Gráfico 21: Comparativo de vazões máximas TR = 100 anos	135
Gráfico 22: Comparativo de vazões máximas TR = 50 anos	135
Gráfico 23: Comparativo de vazões máximas TR = 25 anos	135
Gráfico 24: Comparativo de vazões máximas TR = 5 anos	135

LISTA DE ABREVIATURAS

ANA – Agência Nacional de Água e Saneamento Básico

CN – *Curve Number*

EMP – Enchente Máxima Provável

HEC – *Hydrologic Engineering Center*

HMS – *Hydrologic Modeling System*

ha – Hectare

km² – Quilômetro quadrado

MDE – Modelo Digital de Elevação

MDS – Modelo Digital de Superfície

MDT – Modelo Digital de Terreno

PD – Plano Diretor

PMP – Precipitação Máxima Provável

SCS – *Soil Conservation Service*

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

SNV – Superfície Não Vegetada

tc – Tempo de pico

TR – Tempo de Retorno

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	20
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	23
2.1 Bacia Hidrográfica.....	23
2.2 Ciclo Hidrológico	26
2.3 Precipitação	28
2.3.1 Grandezas e medidas das precipitações	28
2.3.2 Variação da Precipitação	30
2.3.3 Chuvas Intensas.....	31
2.4 Escoamento Superficial	32
2.5 Eventos hidrológicos e impactos associados	34
2.5.1 Eventos Extremos.....	34
2.5.2 Riscos Hidrológicos	36
2.5.3 Medidas Mitigadoras.....	38
2.6 Estatística hidrológica	40
2.6.1 Análise de frequência de eventos hidrológicos extremos	42
2.6.2 Probabilidade e tempo de retorno de eventos extremos.....	44
2.6.3 Riscos Hidrológicos	45
2.6.4 Análise de frequência empírica de vazões máximas.....	46
2.6.5 Análise de frequência de vazões máximas com base em distribuições teóricas ...	47
2.7 Métodos para estimativa de Cheias de Projeto	48
2.8 Modelos de transformação chuva-vazão	50
2.8.1 Curva IDF.....	51
2.8.2 Método Racional	52
2.8.3 Hidrograma Unitário	53
2.8.4 Método SCS-CN	56
2.8.5 Método Huff.....	59
2.9 Modelos de propagação de escoamento	59
2.9.1 Modelo Muskingum-Cunge	60
2.10 Modelos Digital de Elevação	61
2.11 Modelos Hidrológicos para a gestão da cheias.....	62

2.12 Modelagem por meio do HEC-HMS.....	64
3. OBJETIVOS	66
3.1 Geral.....	66
3.2 Específicos	66
4. MATERIAL E MÉTODOS	67
4.1 Área de estudo.....	67
4.2 Materiais	69
4.2.1 Sistemas de Informação Geográfica (SIG)	69
4.2.2 Material cartográfico	69
4.2.4 Imagem Satélite.....	70
4.2.5 HidroWeb	71
4.2.6 Hidro 1.4	71
4.2.7 Hydrologic Modeling System (HEC-HMS).....	71
4.3 Método	71
4.3.1 Aquisição do Modelo Digital de Elevação (MDE)	71
4.3.2 Recorte do MDE	71
4.3.3 Modelo de bacia e dados do terreno.....	72
4.3.4 Pré-processamento	73
4.3.5 Delimitação da bacia e sub bacias.....	75
4.3.6 Tempo de Concentração.....	79
4.3.7 Chuva de projeto e distribuição de Huff	79
4.3.8 Grade de Curve Number (CN)	82
4.3.9 Parâmetros de perda	84
4.3.10 Transformação chuva vazão e o tempo de pico (Lag time)	85
4.3.11 Parâmetros da propagação de vazões	86
4.3.12 Simulação e Resultados.....	88
4.3.13 Análise estatística.....	90
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	91
5.1 Características fisiográficas das sub-bacias do Rio Acre.....	91
5.2 Hietogramas de chuva de projeto das sub-bacias do Rio Acre	97
5.3 Curve Number da Bacia do Rio Acre	105

5.4 Vazões máximas simuladas no HEC-HMS.....	109
5.5 Vazões máximas com base nas distribuições teóricas	129
6. CONCLUSÕES.....	136
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138
APÊNDICE A – Memória de cálculo para elaboração do Hietograma de Projeto para TR de 100 anos.....	146
APÊNDICE B – Memória de cálculo para elaboração do Hietograma de Projeto para TR de 50 anos.....	147
APÊNDICE C – Memória de cálculo para elaboração do Hietograma de Projeto para TR de 25 anos.....	148
APÊNDICE D – Memória de cálculo para elaboração do Hietograma de Projeto para TR de 5 anos.....	149
APÊNDICE E – Resultados das vazões máximas simuladas no HEC-HMS	150
APÊNDICE F – Vazões máximas com base nas distribuições teóricas	151

1. INTRODUÇÃO

A relação do Homem com os cursos d'água remonta à formação das primeiras civilizações. E, apesar de evidentes avanços promovidos ao longo da História, os impactos originários dos processos hidrológicos ainda representam um desafio para a Ciência contemporânea, visto que desequilíbrios frequentes afetam diversas vertentes, comprometendo os elementos primordiais da Segurança Hídrica (MONTEFUSCO *et al.*, 2021).

O registro de eventos hidrológicos extremos aponta para maior frequência e magnitude, bem como quanto ao potencial danoso. Sabe-se que o avanço na exposição de bens aos efeitos de tais eventos também é componente do conceito de risco e parte importante do processo que integra a gestão dos efeitos associados aos eventos hidrológicos (SOUZA *et al.*, 2016; OLIVEIRA *et al.*, 2021).

Neste sentido, Urbani *et al.* (2023) destacam as inundações entre os principais desastres de natureza hidrológica, dado seu potencial danoso, especialmente em áreas mais vulneráveis. Os autores elencam a ação antrópica no processo de urbanização, a ocupação urbana desordenada, especialmente em áreas de várzea, entre outros, entre os fatores que contribuem para a ocorrência de inundações urbanas severas. Adicionalmente, mencionam que as mudanças climáticas são elemento importante na composição e intensificação do risco associado a intensificação das inundações urbanas (RIBEIRO; LIMA, 2011; WING *et al.*, 2020).

Nesta conformidade, a realização de estudos sobre as áreas suscetíveis se apresenta como elemento importante no que compete à tomada de decisão para a gestão e mitigação dos problemas causados pelas inundações urbanas. Neste sentido, muitos instrumentos técnico-metodológicos já foram concebidos sob o propósito de apurar as relações entre as variáveis hidrológicas, sobretudo no contexto presente, em que já é quase consenso sobre a ocorrência de alterações climáticas e seus impactos na gestão dos recursos hídricos.

A análise e enfrentamento das enchentes devem incluir o uso de simulações matemáticas para facilitar o planejamento de intervenções, como o zoneamento da ocupação do solo, previsão de cheias e avaliação dos impactos de infraestruturas como reservatórios de controle de cheias. A integração entre modelos chuva-vazão e hidrodinâmicos é uma abordagem eficaz para estimar, por exemplo, a redução da vazão após a construção de um reservatório e delinear áreas inundadas em eventos ocorridos ou projetados com diferentes tempos de retorno (NETO *et al.*, 2021).

A gestão de recursos hídricos enfrenta desafios significativos, sendo o monitoramento hidrológico uma ferramenta crucial para apoiar a tomada de decisões em bacias hidrográficas. No entanto, a falta de dados monitorados da vazão e chuva tem sido um desafio para gestão

eficiente dos recursos hídricos. Desse modo, para Neto *et al.* (2021) um dos grandes desafios na análise de inundações extremas é a falta de dados confiáveis sobre o nível da água, vazão e a extensão espacial da área inundada, necessários para calibrar os modelos, o que aumenta a incerteza dos resultados.

A estimação de quantis associados às vazões dos cursos d'água, tanto pela modelagem estocástica quanto determinística são elementos importantes à tomada de decisão frente aos impactos de inundações extremos, bem como à concepção de estruturas que amparam a gestão racional dos recursos hídricos (OLIVEIRA *et al.*, 2021).

De fato, o mapeamento por meio de técnicas que utilizam modelos meteorológicos, hidrológicos e hidráulicos, associados às técnicas de geoprocessamento se destacam como ferramentas importantes para a compreensão dos processos que envolvem as inundações, especialmente em um contexto regional. A partir daí, são capazes de subsidiar a simulação de eventos futuros e promover ações eficientes de planejamento urbano (CABRAL *et al.*, 2016; URBANI *et al.*, 2023).

Diversos estudos foram realizados a partir da utilização da modelagem hidráulica e hidrológica, associada às ferramentas de geoprocessamento e destacaram resultados satisfatórios quanto à determinação de manchas de inundação em canais urbanos, além da construção de cenários para a tomada de decisão sobre intervenções e práticas de gestão dos impactos de eventos extremos. Entre as ferramentas destacam-se os softwares HEC-HMS e HEC-RAS (RIBEIRO; LIMA, 2011; CABRAL *et al.*, 2016; SANTOS, 2017).

A plataforma HEC (*Hydrologic Engineering Center*) foi desenvolvida pela Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (*U. S. Army Corps of Engineers*). Dispõe de módulos hidráulicos e hidrológicos para a simulação, tendo o HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*) e o HEC-RAS (*Hydraulic Modeling System*) como os principais (RIBEIRO; LIMA, 2011; SOUZA *et al.*, 2012).

As ferramentas HEC são demasiadamente utilizadas em estudos voltadas à delimitação de regiões sujeitas a inundações, com o intuito de subsidiar os tomadores de decisão quanto à implementação de ações de atenuação e/ou mitigação dos impactos de associados e eventos extremos (URBANI *et al.*, 2023).

O estado do Acre, localizado na Amazônia, apresenta sazonalidade, com períodos de seca e cheias definidas (TAMWING *et al.*, 2021). Recentemente, intensificaram-se eventos extremos, como as inundações de 2024, que afetaram severamente os municípios do estado. A capital, Rio Branco, enfrentou a segunda maior cheia de sua história. Segundo os órgãos de Proteção e Defesa Civil, as inundações de 2024 são consideradas o maior desastre ambiental já

registrado no Acre. Das 22 cidades, 19 estão em situação de emergência, o que representa 86% do estado. O número de pessoas afetadas, incluindo desalojados e desabrigados, ultrapassou 120 mil (MUNIZ, 2024).

Nesta conformidade, o objetivo do presente estudo é estimar os valores de vazões máximas por meio de modelagem hidrológica utilizando o HEC-HMS, com recorte na bacia hidrográfica do rio Acre, na cidade de Rio Branco.

O estudo se justifica, uma vez que a cidade de rio Branco é atingida por recorrentes cheias com potencial de inundar grande parte do perímetro urbano e impactos sobre a população mais vulnerável (OLIVEIRA *et al.*, 2021). Além disso, busca promover uma discussão ampla a respeito da temática da ocupação e uso da terra em bacias hidrográficas urbanas e a incorporação de instrumentos de gestão do risco associado a eventos extremos.

Conforme Cabral *et al.*, (2016), a busca por soluções para os problemas de enchentes urbanas, que impactam diretamente a qualidade de vida das populações, deve ser fundamentada em conhecimentos técnicos e científicos que integrem a hidrologia urbana, a hidráulica e o geoprocessamento. As inundações são um desafio recorrente em várias cidades brasileiras, especialmente nas áreas densamente ocupadas, onde causam prejuízos significativos e, em muitos casos, resultam em perdas de vidas humanas.

O estado do Acre sofre com a falta de dados hidrológicos em suas bacias hidrográficas, tornando necessário buscar alternativas para a gestão eficiente dos recursos hídricos e mitigar inundações. O uso de modelos hidrológicos baseados em simulações matemáticas, associados a ferramentas de geoprocessamento e monitoramento remoto, pode ser uma solução viável. Neste sentido, o presente trabalho busca colaborar com a formulações de políticas públicas que visem melhorar a capacidade de previsão e resposta a eventos extremos, ajudando a minimizar os impactos sobre a população e a infraestrutura local.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Bacia Hidrográfica

De acordo com Tucci *et al.* (2009), a bacia hidrográfica é uma área natural de captação da água de precipitação, conduzindo o escoamento para um único ponto de saída. Esta área é composta por superfícies vertentes e uma rede de drenagem formada por cursos d'água que confluem até um ponto denominado exutório, onde o escoamento converge.

Barrella (2001) amplia essa definição ao descrever a bacia hidrográfica como um conjunto de terras drenadas por um rio e seus afluentes, delimitado por divisores de água nas regiões mais elevadas do relevo. Nesse contexto, a água precipitada ou escoada superficialmente, formando riachos e rios, ou infiltra no solo, contribuindo para a formação de nascentes e para o abastecimento do lençol freático. O escoamento superficial das águas segue o gradiente natural do terreno, descendo das regiões mais altas para as mais baixas. Ao descerem, esses pequenos cursos d'água se unem a outros, aumentando seu volume e formando rios maiores, que continuam a receber água de tributários ao longo do seu trajeto até desembocarem no oceano.

Segundo Collischonn e Dornelles (2013), no âmbito da hidrologia da engenharia a bacia hidrográfica é o elemento fundamental para a análise do ciclo hidrológico. Ainda de acordo com os autores, a bacia hidrográfica pode ser considerada como um sistema física de entradas e saídas de água, onde a entrada ocorre através de eventos de precipitação e as saídas através do escoamento e da evapotranspiração.

O relevo e a hidrografia são dois aspectos fundamentais na constituição das bacias hidrográficas. A separação das bacias se dá por divisores de água, formações elevadas que dividem as nascentes, determinando o destino dos fluxos de água para uma bacia ou outra. A delimitação territorial de uma bacia hidrográfica, elaborada a partir dos divisores de água, é crucial para a análise sistêmica de fatores ambientais, sociais e econômicos, tanto no âmbito interno quanto externo à bacia (TUCCI *et al.*, 2009).

Uma bacia hidrográfica pode ser caracterizada a partir de diversos aspectos fisiográficos, hidrológicos e ambientais, que influenciam diretamente o comportamento do escoamento hídrico e a dinâmica ambiental da região. Nesse sentido, conforme Lima, *et al.* (2021), a caracterização de uma bacia hidrográfica é fundamental para o avanço no entendimento das dinâmicas ambientais e antrópicas associadas, sendo uma ferramenta essencial na gestão ambiental, especialmente no que se refere à degradação decorrente do uso e cobertura do solo.

Ainda de acordo com Lima *et al.* (2021), nas últimas décadas, o uso do geoprocessamento, por meio de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), tem se mostrado indispensável na análise de dados físicos das bacias. Essa tecnologia facilita não apenas a organização e interpretação das informações, mas também a apresentação de resultados e o apoio ao planejamento e à tomada de decisões relativas ao manejo territorial.

Conforme apresentado na Figura 1, uma bacia hidrográfica é composta por alguns elementos fundamentais, que devem ser analisados para fins de estudos de comportamento hidrológico. De acordo com Tucci *et al.* (2009), a bacia é composta por uma rede de drenagem, que é composta pelo rio principal e seus afluentes (tributários), este rio principal liga a nascente ao ponto de saída da bacia (exutório), no qual deságua em uma bacia hidrográfica maior ou no oceano.



Figura 1: Elementos de uma bacia hidrográfica
Fonte: Adaptado de Lima *et al.* (2021)

Além de sua importância ambiental, as bacias hidrográficas também são ecossistemas que permitem a avaliação dos impactos das atividades antrópicas. Esses impactos, quando não controlados, podem representar um risco ao equilíbrio ecológico e comprometer a quantidade e qualidade da água disponível, como apontado por Carvalho (2020).

A lei federal nº 9.443 de janeiro de 1997, conhecida como Lei das Águas estabelece a bacia hidrográfica como unidade de planejamento dos recursos hídricos (BRASIL, 1997), o que

demonstra a relevância desse recorte espacial na gestão hídrica, sendo uma unidade física de reconhecimento, caracterização e avaliação dos recursos hídricos.

A subdivisão de uma bacia de maior porte em sub-bacias facilita a identificação de focos de degradação e problemas difusos, permitindo um planejamento ambiental mais eficiente. Lima e Nery (2017) ressaltam que essa abordagem torna mais fácil diagnosticar os processos de degradação ambiental e o grau de comprometimento da produção sustentada. Embora os conceitos de sub-bacia e microbacia hidrográfica apareçam frequentemente na literatura técnico-científica, nem sempre encontram a mesma convergência conceitual observada para a bacia hidrográfica em si, conforme pode ser observado no Quadro 1.

Quadro 1: Classificação de sub-bacias em função da área

Autores	Parâmetros para definição de sub-bacia
Faustino (1996)	$100\text{km}^2 < \text{Área da bacia} < 700\text{km}^2$
Rocha (1997, apud Martins e al., 2005)	$200\text{km}^2 < \text{Área da bacia} < 300\text{km}^2$

Fonte: Adaptado de Teodoro *et al.* (2007)

De acordo com Santana (2003), as bacias hidrográficas podem ser subdivididas em diversas sub-bacias, dependendo do ponto de saída considerado ao longo do seu canal principal ou eixo-tronco. Cada sub-bacia se conecta a uma bacia de hierarquia superior, formando um sistema integrado. Dessa forma, conforme este autor, infere-se que os termos de bacia e sub-bacia são relativos, variando conforme a posição dentro da hierarquia do sistema hidrográfico.

A abordagem ambiental que parte da caracterização fisiográfica de bacias e sub-bacias hidrográficas adquire especial relevância no contexto da exploração de reservas de hidrocarbonetos não convencionais, sobretudo em fases pré-operacionais. Esse tipo de análise permite compreender o comportamento dos elementos físicos em diferentes escalas espaciais – local, sub-regional e regional – contribuindo para uma gestão mais eficiente e sustentável dos recursos naturais (LIMA *et al.*, 2021)

Dada sua estrutura "multinível", a bacia hidrográfica é um espaço preferencial para análises e planejamentos ambientais e sociais. Todas as ações políticas, econômicas e culturais, internas ou externas à bacia, repercutem em sua totalidade espacial. No entanto, conforme enfatizado por diversos autores, a gestão das águas por bacia hidrográfica enfrenta desafios, principalmente pela dificuldade em compatibilizar tempos e espaços administrativos com essa visão de gerenciamento territorial (LIMA e NERY, 2017).

2.2 Ciclo Hidrológico

A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, no Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil, diz que o ciclo hidrológico segue uma dinâmica complexa, impulsionada por diversos fatores, como as correntes atmosféricas, que transportam vapor de água pelos continentes, e a gravidade, responsável pela precipitação, infiltração e movimentação das massas de água. Outro fator essencial é a energia térmica proveniente do Sol, que impulsiona a evaporação da água das superfícies líquidas e vegetais, reiniciando o ciclo (BRASIL, 2024).

De acordo com Tucci (2009), o ciclo hidrológico é um processo global de circulação da água, conhecido como ciclo hidrológico, pode ser definido como um sistema fechado entre a superfície terrestre e a atmosfera, designado como hidrosfera.

A energia solar e a gravidade são os principais motores deste fenômeno, que envolve a formação, transferência e acumulação de água em diferentes compartimentos da hidrosfera. A água que evapora das superfícies terrestres e dos oceanos condensa-se em nuvens e, eventualmente, precipita-se novamente sobre a superfície terrestre. A precipitação que ocorre sobre a terra pode se apresentar de várias formas, como chuva, granizo e neve. A maior parcela dessa água que cai na superfície terrestre fica temporariamente no solo próximo de onde caiu e depois retorna à atmosfera através da evaporação e transpiração das plantas e seres vivos. Uma parte da água da precipitação escoar através dos rios fazendo que chegue aos oceanos ou infiltre-se no solo e nas rochas. A infiltração permite que a água penetre no solo e em aquíferos subterrâneos, onde pode ser absorvida pelas raízes das plantas e devolvida à atmosfera pelo processo de transpiração (TUCCI *et al.*, 2009; COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

A partir da análise do ciclo hidrológico, conforme descrito anteriormente e apresentado na Figura 2, pode-se verificar os fenômenos hidrológicos importantes para concepção de projetos de engenharia hidráulicas, nos quais destacam-se:

- Precipitação: Representa qualquer tipo de fenômeno relacionado à queda de água do céu, incluindo neve, chuva e chuva de granizo (Rocha, 2023);
- Evaporação: Processo de transferência de água líquida para vapor do ar diretamente de superfícies líquida (Collischonn e Dornelles, 2013);
- Transpiração: Envolve o processo de retirada de água do solo pelas raízes das plantas, transporte de água através da planta até as folhas através do processo de fotossíntese (Collischonn e Dornelles, 2013);

- Escoamento Superficial: Representa o fluxo da água sobre a superfície do solo e pelos seus múltiplos canais (Rocha, 2023);
- Escoamento Subterrâneo: Representa o fluxo devido à contribuição do aquífero (Rocha, 2023);

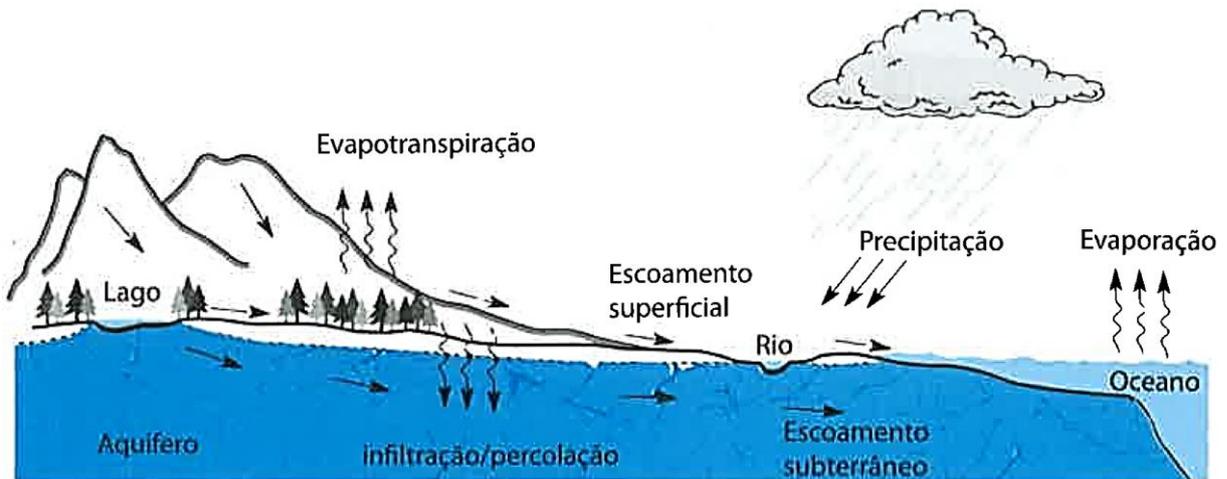


Figura 2: Ilustração dos fenômenos hidrológicos que ocorrem no ciclo hidrológico
 Fonte: Collischonn e Dornelles (2013)

Para Collischonn e Dornelles (2013), o ciclo hidrológico é o conceito central da hidrologia. Ainda de acordo com o autor, é um ciclo fechado, quando analisado no contexto global. Em escalas regionais, podem ocorrer sub-ciclos, como por exemplo, a água de um rio pode evaporar, condensar e novamente precipitar antes de retornar ao oceano.

De acordo Vilela e Matos (1975), embora o ciclo hidrológico possa parecer um mecanismo contínuo, não é, pois o movimento e troca da água em cada fase ocorre de forma aleatória, variando tanto no espacialmente como durante o tempo.

Ainda conforme Vilela e Matos (1975), as transformações ocorridas no ciclo hidrológico podem ser analisadas através da equação hidrológico, em um determinado intervalo de tempo, conforme apresentado abaixo:

$$I - O = \Delta S \quad (1)$$

Onde:

I – representa as “entradas” de água, incluindo escoamento superficial, subterrâneo e a precipitação sobre a superfície do solo;

O – representa as “saídas” de água do volume de controle, devido ao escoamento superficial e subterrâneo, à evaporação e à transpiração;

ΔS – variação no armazenamento nas várias formas de retenção da água, no volume de controle.

De acordo com Canal (2011), a importância do ciclo hidrológico, conhecido também como ciclo da água, relaciona-se ao movimento e à troca de água, em todos os seus estados físicos, entre o oceano, calotas de gelo, águas superficiais e subterrâneas e a atmosfera.

2.3 Precipitação

2.3.1 Grandezas e medidas das precipitações

Conforme mencionado anteriormente a água que cai na superfície na forma de chuva, granizo, neve, orvalho, neblina, entre outras formas é considerada precipitação. Conforme Collischonn e Dornelles (2013), a precipitação é principal entrada de água na bacia hidrográfica, sendo um elemento essencial para concepção de projetos hidráulicos, tais como obras de drenagem, abastecimento de água, controle de inundações, entre outros. Além disso, a precipitação representa uma variável importante no processo hidrológico e é caracterizada pela grande aleatoriedade no tempo e espaço.

Rocha (2023), também destaca que a variabilidade temporal e espacial da precipitação desempenha um papel crucial na dinâmica da disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica, afetando diretamente os processos hidrológicos, como o escoamento superficial, a infiltração no solo, a evaporação, a transpiração e a recarga dos aquíferos. Esses processos, por sua vez, são determinantes para o comportamento das vazões nos cursos d'água, influenciando tanto a quantidade de água disponível quanto sua distribuição ao longo do tempo. Assim, compreender a variação da precipitação é fundamental para a gestão eficaz dos recursos hídricos e para a modelagem de cenários de vazões máximas e mínimas nas bacias hidrográficas.

A quantidade de chuva, é expressa pela altura da água que cai e se acumula sobre uma superfície plana e impermeável, representado normalmente pelas letras h ou P . Esse valor é obtido através de medições realizadas em pontos específicos utilizando-se de instrumentos denominados pluviômetros ou pluviógrafos. A altura pluviométrica, normalmente, expressa em milímetros.

Os pluviômetros são receptáculos simples que acumulam a água precipitada, enquanto os pluviógrafos registram as alturas da água ao longo do tempo. As medições feitas com pluviômetros são realizadas periodicamente, geralmente a cada 24 horas, sendo o horário padrão para essas leituras às 7 horas da manhã (Collischonn e Dornelles, 2013). Utiliza-se um pluviógrafo, também chamado de pluviômetro registrador ou udógrafo, quando necessita-se

verificar além da altura total de chuva referente a um determinado período, a intensidade dessas precipitações em cada instante ao longo desse período.

No Brasil, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) possui uma rede de observação com pluviômetros, os dados observados são disponibilizados para o usuário baixar os dados das estações pluviométricas e fluviométricas através do Portal HidroWeb (Collischonn e Dornelles, 2013). A ANA gerencia diretamente 4.841 estações, sendo: 2.717 pluviométricas (dados de chuvas) e 2.024 estações fluviométricas (dados dos rios) (Brasil, 2024).

Tucci *et al.* (2009) discutem a variabilidade espacial e temporal da precipitação, abordando como ela é distribuída geograficamente em diferentes regiões e como essas distribuições variam ao longo do tempo. O estudo destaca a importância de compreender esses padrões para garantir uma gestão eficaz dos recursos hídricos. Quanto à precisão e confiabilidade dos instrumentos de medição, como pluviômetros e radares meteorológicos, os autores enfatizam a importância da calibração e manutenção adequadas desses equipamentos.

Além disso, ao empregar técnicas estatísticas para a análise de dados de precipitação, Tucci *et al.* (2009) ressaltam a relevância de identificar tendências, principalmente para verificar a ocorrência de eventos extremos. Através da utilização de modelos hidrológicos, torna-se possível simular o comportamento da bacia em resposta a diferentes eventos de precipitação, permitindo assim previsões mais precisas e avaliações de cenários futuros, essenciais para o planejamento e a mitigação de desastres hidrológicos.

Conforme Collischonn e Dornelles (2013) e Vilela e Matos (1975), as variáveis que caracterizam a chuva são:

- **Altura:** Corresponde à lâmina de água precipitada sobre uma área específica, sendo expressa em milímetros (mm). As medições realizadas com os pluviômetros fornecem este valor.
- **Intensidade:** Refere-se à relação entre a altura pluviométrica e a duração da precipitação, sendo geralmente expressa em mm/h ou mm/min. Esta grandeza indica a taxa de precipitação ao longo do tempo.
- **Duração:** Representa o período de tempo entre o início e o fim da precipitação, podendo ser expresso em horas (h) ou minutos (min).
- **Frequência:** Representa a quantidade de ocorrências de eventos iguais ou superiores ao evento de chuva considerado.

2.3.2 Variação da Precipitação

A precipitação apresenta variações tanto em termos espaciais quanto temporais, influenciadas por fatores geográficos e sazonais. O entendimento da distribuição e da variabilidade da precipitação ao longo do tempo e do espaço é essencial para o planejamento eficiente de recursos hídricos, bem como para a elaboração de projetos hidráulicos (VILELA e MATOS, 1975).

A variabilidade espacial da chuva durante um determinado evento pode ser significativa, e os instrumentos de medição, como pluviômetros e pluviógrafos, possuem um alcance limitado de cobertura, geralmente em torno de 400 cm². Isso é evidente ao comparar os dados de estações pluviométricas localizadas na mesma região, que frequentemente apresentam diferenças substanciais nos valores de precipitação registrados. Nas áreas onde a variabilidade espacial é influenciada pela declividade e altitude do relevo, essa diferença torna-se ainda mais pronunciada, conforme apresentado na Figura 3 (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

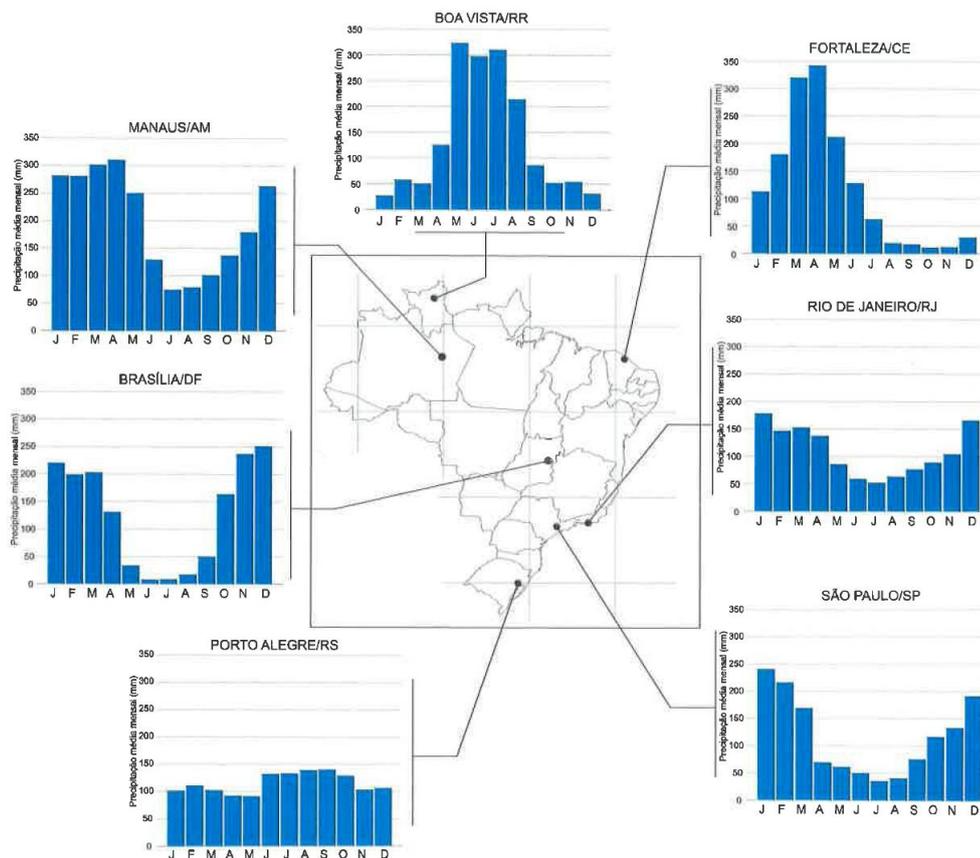


Figura 3: Variabilidade temporal da chuva
Fonte: Collischonn e Dornelles (2013)

Tanto Collischonn e Dornelles (2013) quanto Vilela e Matos (1975) concordam que a variabilidade sazonal da precipitação varia de acordo com a região. Por exemplo, algumas

regiões do Brasil apresentam uma forte variabilidade sazonal, com estações extremamente secas ou muito úmidas, enquanto em outras áreas a precipitação é mais uniformemente distribuída ao longo do ano, como ilustrado na Figura 3. Essa variação sazonal e geográfica da chuva torna crucial a análise detalhada das condições climáticas locais para uma gestão eficaz dos recursos hídricos e para o desenvolvimento de estratégias de adaptação a eventos hidrológicos extremos.

2.3.3 Chuvas Intensas

Chuvas intensas, ou precipitações máximas, são caracterizadas por intensidades que ultrapassam um determinado limite, sendo fundamentais para o estudo de eventos extremos. O conhecimento detalhado dessas precipitações é crucial, pois elas frequentemente resultam em cheias, que podem acarretar sérios prejuízos econômicos, sociais e ambientais (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013). Portanto, a compreensão dos padrões de distribuição, intensidade e frequência dessas chuvas é essencial para a mitigação de desastres e o planejamento de estratégias eficazes de gestão de recursos hídricos e prevenção de enchentes.

Através do conhecimento detalhado das características das chuvas intensas é possível realizar estudos de engenharia de recursos hídricos, assim elaborar projetos de infraestruturas hidráulicas, como vertedores de barragens, sistemas de drenagem, galerias pluviais e dimensionamento de bueiros (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

Os dados utilizados na análise de chuvas intensas são tradicionalmente obtidos a partir de registros das estações pluviométricas, o que possibilita a determinação das intensidades máximas de precipitação para diferentes durações. Vilela e Matos (1975) apontam que esses dados permitem calcular as máximas intensidades de um evento de precipitação, sem que seja necessário incluir as durações mais curtas nas mais longas. As durações típicas analisadas variam entre 5 minutos e 24 horas, com intervalos comuns de 5, 10, 15, 30 e 45 minutos, além de 1, 2, 3, 6, 12 e 24 horas.

De acordo com Collischonn e Dornelles (2013), é comum o uso de durações de chuvas de 5 e 10 minutos, 1, 12 e 24 horas, além de períodos de 2 e 5 dias. Os resultados dessas análises são geralmente apresentados na forma de um gráfico que relaciona intensidade, duração e frequência de excedência (ou período de retorno), conhecido como curva IDF (Intensidade-Duração-Frequência). Esse gráfico é fundamental para representar a relação entre essas variáveis e prever a frequência de ocorrência de chuvas intensas, sendo uma ferramenta indispensável para o dimensionamento de obras hidráulicas e o planejamento de recursos hídricos

2.4 Escoamento Superficial

O escoamento superficial diz respeito à água que escoar na superfície terrestre. Tem origem na interação dos componentes do ciclo hidrológico com a ocorrência de precipitação, quando atinge o solo, sendo parte infiltrada até que o solo atinja o limite de saturação e o excesso é escoado pela superfície do terreno. A vazão, ou volume escoado por unidade de tempo, é a principal grandeza que caracteriza o escoamento. Normalmente é expressa em m^3/s ou em l/s (TUCCI, 2012; CRUZ, 2019).

De acordo com Mello *et al.* (2020) o escoamento superficial é um dos processos mais estudados e modelados na hidrologia, por se tratar de uma das fases mais relevantes do ciclo hidrológico. Os autores acrescentam que se trata de uma das fontes mais utilizadas para suprir a demanda de água para abastecimento público, industrial, além das atividades do meio rural, entre outras.

A água responsável por esse escoamento provém principalmente das chuvas, embora, em alguns países, o degelo também seja uma fonte significativa. No Brasil, um país tropical, a precipitação pluviométrica desempenha um papel central na hidrologia, sendo a principal responsável pela geração de escoamento superficial (BERTONI, 2007).

O processo de escoamento superficial se inicia quando a taxa de precipitação excede a capacidade de infiltração e retenção do solo. Nesse momento, a água começa a fluir sobre a superfície do terreno, acumulando-se em depressões e pequenos canais, que eventualmente convergem para formar córregos, rios e lagos (TUCCI, 2012). A qualidade da água nesses corpos hídricos está diretamente relacionada ao volume de escoamento superficial e aos sedimentos e nutrientes transportados por ele. A quantificação do escoamento superficial é obtida por meio de medições das vazões em seções específicas de cursos d'água.

O escoamento superficial engloba tanto o excedente de precipitação que ocorre logo após uma chuva intensa, quanto o escoamento de rios, que pode ser alimentado tanto pelo excesso de precipitação quanto por águas subterrâneas. O escoamento que ocorre durante os períodos de secas pode ser chamado de escoamento subterrâneo, pois a maior parte do volume de água escoado está surgindo pelo fluxo de água do subsolo, esse tipo é escoamento também é denominado escoamento de base (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

Diversos fatores influenciam no processo de escoamento superficial, podendo ser de natureza climática ou fisiográfica. Entre os fatores climáticos, destacam-se a intensidade e a duração da precipitação. Chuvas intensas fazem com que o solo atinja rapidamente sua capacidade de infiltração, gerando excesso de precipitação que escoar pela superfície. A duração da precipitação também é um fator crucial, pois, quanto mais longa for a chuva, maior será a

oportunidade de escoamento superficial. A precipitação antecedente também deve ser considerada, pois um solo já úmido de chuvas anteriores tende a escoar mais rapidamente a água das chuvas subsequentes. Quanto aos fatores fisiográficos, os mais relevantes são a área da bacia, sua forma, a permeabilidade do solo e a topografia (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

A parcela de precipitação que promove o escoamento superficial direto é de chamada de precipitação efetiva e está relacionada com a ocorrência de enchentes e inundações e, portanto, elemento importante para a gestão de desastres naturais, destacadamente os de natureza hidrológica (MELLO *et al.*, 2020).

O escoamento superficial proporciona a geração de um hidrograma, que é a representação gráfica que relaciona a vazão no tempo. A distribuição da vazão no tempo é resultado da relação entre os componentes do ciclo hidrológico e a ocorrência da precipitação e a vazão na bacia hidrográfica. O hidrograma típico de uma bacia hidrográfica é representado na Figura 4. O hidrograma atinge o máximo, de acordo com a distribuição da precipitação ao longo da bacia e apresenta recessão a partir do ponto de inflexão (TUCCI, 2012, CRUZ, 2019).

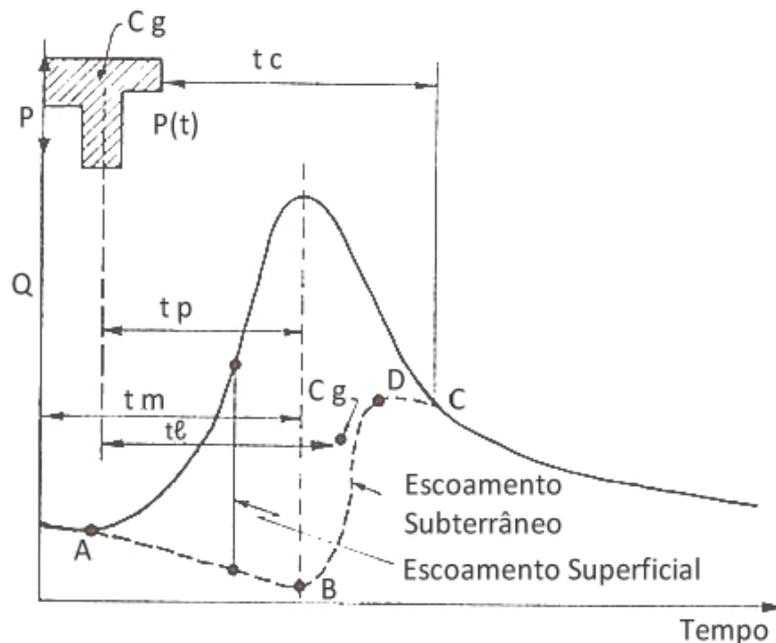


Figura 4: Representação do hidrograma de para um evento de cheia em uma bacia hidrográfica
Fonte: Tucci (2012).

A realização de simulações dinâmicas do escoamento superficial pode contribuir para gestão dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica que não tem dados de estações hidrológicas suficientes.

2.5 Eventos hidrológicos e impactos associados

2.5.1 Eventos Extremos

Segundo Duarte *et al.* (2015), eventos extremos são fenômenos climáticos que se destacam por ocorrerem fora dos padrões normais, como períodos prolongados de seca, altas frequências de precipitações intensas, e outros tipos de condições meteorológicas severas. Esses eventos têm provocado impactos significativos em várias cidades do Brasil, incluindo mortes, feridos, desabrigados, aumento de doenças, perdas econômicas e danos ambientais.

De acordo com Da Silva *et al.* (2023), a intensificação de eventos climáticos extremos já é uma realidade global. Na Amazônia brasileira, eventos como secas e inundações são os mais frequentes. Conforme os autores, foram registrados 202 os eventos extremos no estado do Acre, entre 1987 e 2023, com um aumento crescente na frequência desses eventos e na ocorrência de múltiplos eventos extremos no mesmo ano desde 2010.

Quando a quantidade de água que chega o curso d'água e ultrapassa a sua capacidade de drenagem resulta em inundação das áreas ribeirinhas. Os principais fatores que influenciam na ocorrência de inundações estão ligados às condições meteorológicas e hidrológicas, além de outros processos que atuam na bacia hidrográfica: relevo, regime pluviométrico, cobertura vegetal, ocupação urbana etc. (MONTE *et al.*, 2016; ANDRADE, 2017; CRUZ, 2019).

Com o crescimento acelerado das cidades, principalmente na metade do Século XX, houve maior ocupação das áreas de várzea, aumentando as consequências associadas à ocorrência de inundações. Tanto o Brasil quanto outros países em desenvolvimento enfrentam problemas com o crescimento desordenado e, conseqüentemente, na infraestrutura, promovendo maior vulnerabilidade aos efeitos de enchentes (TUCCI, 2012; SOUZA, 2017) Conforme pode ser observado na Figura 5, a impermeabilização causada pela intensa urbanização, aumenta o escoamento superficial.

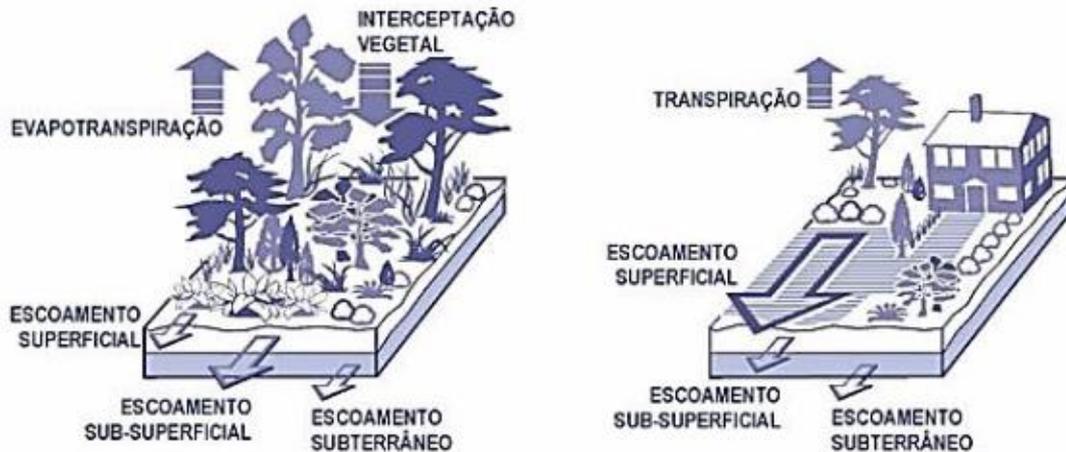


Figura 5: Impactos da urbanização no ciclo hidrológico
 Fonte: Adaptado Cabral (2024), apud TUCCI (2007).

Todavia, a urbanização não é exclusividade de grandes centros urbanos. Muitas cidades menores também registram prejuízos econômicos, sociais e ambientais decorrentes de inundações. Neste sentido, Souza (2017) destaca que o crescimento urbano desordenado aumenta a frequência e a magnitude dos efeitos das inundações, entre outros problemas urbanos, visto que o aumento considerável de área impermeável provoca alteração no escoamento superficial, promovendo alterações no hidrograma produzido.

No Brasil, por suas características de geologia e de clima, aparecem como desastres naturais mais comuns as inundações, as secas e os deslizamentos de encostas, que estão fortemente relacionados à ocorrência de fenômenos climáticos, em especial aos denominados “eventos extremos”. As inundações e as secas têm cada vez mais chamado a atenção da sociedade, uma vez que causam impactos econômicos e sociais importantes (BRASIL, 2010).

A falta de planejamento relativa à ocupação é comum em praticamente todas as cidades brasileiras, comprometendo os pilares da segurança hídrica e elementos basais dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS). Para o enfrentamento ao problema das inundações urbanas é necessário que haja um planejamento integrado dos atores envolvidos, no intuito de promover medidas tanto estruturantes quanto não estruturantes, no sentido de atenuar os impactos à população vulnerável (FRUTUOSO *et al.*, 2020).

Conforme descrito no documento intitulado *Mapeamento de Riscos em Encostas e Margens de Rios* do Ministério das Cidades (BRASIL, 2007), é essencial compreender alguns conceitos fundamentais relacionados a eventos hidrológicos extremos. Dentre os principais conceitos destacados estão:

- Enchentes: Definidas como a elevação temporária do nível de água em um corpo hídrico, resultante de chuvas intensas que ultrapassam a capacidade de drenagem natural dos rios, causando transbordamentos, também conhecido como cheia.
- Inundações: Relacionadas ao aumento do nível da água que atinge áreas de várzea e regiões planas adjacentes aos rios. Estas ocorrem frequentemente em períodos de chuva intensa, podendo ser agravadas pela ocupação desordenada das margens fluviais.

Na Figura 6 apresenta-se de forma didática os processos de enchentes e inundações. Ressalta-se, conforme apresentado nos itens anteriores, esses eventos extremos, frequentemente causados por condições meteorológicas severas, são amplamente influenciados pela topografia local, uso do solo e capacidade de drenagem das bacias hidrográficas, o que torna a compreensão desses conceitos crucial para a gestão de riscos e o planejamento urbano em áreas vulneráveis.



Figura 6: Perfil esquemática de uma situação de enchente e inundação
Fonte: Brasil, 2007

As enchentes e inundações tornaram-se um problema mais evidente com o crescimento populacional desordenado e a ocupação de áreas de várzea e planícies de inundação. Macedo (2010) destaca que, durante os picos de cheias, a água invade áreas habitadas, causando não apenas prejuízos econômicos, mas também danos ambientais e à saúde humana.

2.5.2 Riscos Hidrológicos

De acordo com Brasil (2007), o risco representa a relação entre a possibilidade de acontecer um determinado evento ou fenômeno, e a magnitude dos prejuízos ou impactos sociais, econômicos sobre um determinado indivíduo, conjunto ou sociedade, ou seja, quanto maior a vulnerabilidade, maior o risco.

O risco associado a desastres naturais, como inundações, é composto por três variáveis: vulnerabilidade, exposição e ameaça (ROAF *et al.*, 2009). Essas variáveis determinam o potencial impacto de eventos climáticos. O impacto é amplamente influenciado pelas características locais de vulnerabilidade e pelo nível de exposição à ameaça de eventos extremos hidrológicos.

A equação do risco de impacto, descrita abaixo, demonstra que, se uma dessas variáveis for eliminada, o risco pode ser reduzido significativamente (ROAF *et al.*, 2009).

$$\text{Risco do impacto} = \text{ameaça} \times \text{vulnerabilidade} \times \text{exposição} \quad (2)$$

A Figura 7 apresenta de forma didática, que ao minimizar o maior número de fatores que compõem o "triângulo de risco", menor será a probabilidade de impactos negativos, ou seja, a redução do risco ocorre pela redução da vulnerabilidade e exposição.

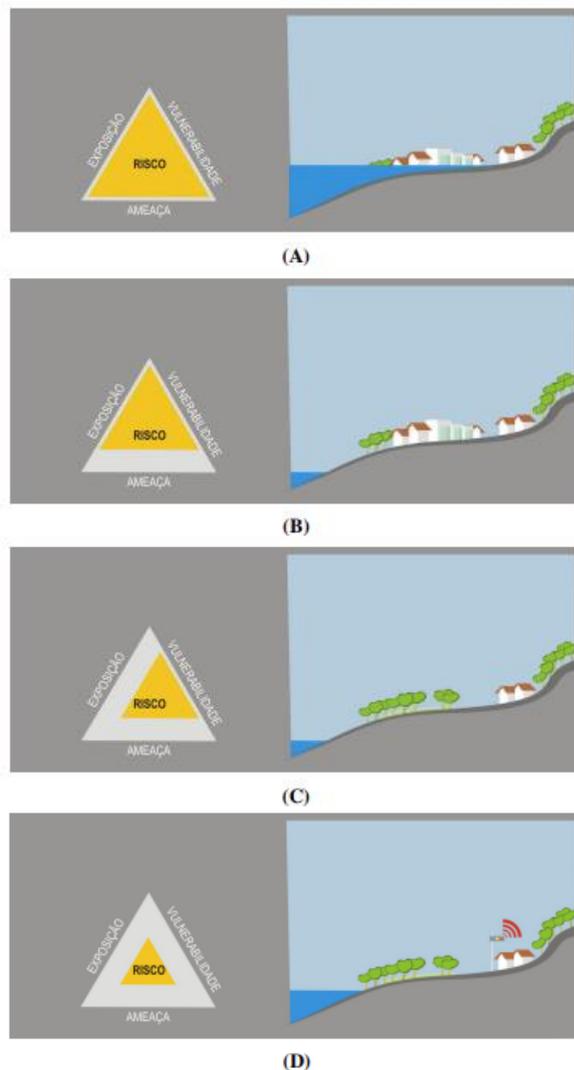


Figura 7: Triângulo de risco, proposto por Crichton (1999)
Fonte: Graciosa (2010), apud Andrade (2006)

2.5.3 Medidas Mitigadoras

As soluções de enfrentamento ao problema das inundações urbanas envolvem um conjunto complexo de ações multidisciplinares, incluindo ferramentas de modelagem e dos processos hidrológicos que atuam sobre a bacia hidrográfica. Essas ferramentas se apresentam como instrumentos de apoio à tomada de decisão sobre as medidas de intervenção.

O planejamento de recursos hídricos precisa evoluir de uma abordagem que pressupõe a capacidade de prever e controlar o futuro, para uma visão que reconhece a incerteza inerente à previsão de eventos hidrológicos. Essa incerteza deve ser traduzida em cenários que considerem futuros potenciais, exigindo uma estratégia de adaptação que forneça flexibilidade ao sistema de recursos hídricos para operar de forma eficaz diante de diferentes cenários alternativos, constituindo uma estratégia robusta (BRASIL, 2007).

De acordo com Silva (2018), a elaboração de um Plano Diretor (PD) de uma cidade deve estar alinhada com o Planejamento e Gerenciamento de Riscos, levando em consideração a bacia hidrográfica envolvida no processo de urbanização. Isso inclui o adequado manejo das águas pluviais, com o objetivo de propor soluções eficazes para a drenagem urbana, bem como a preservação de áreas que, durante períodos de cheia, possam conter o volume de água, evitando, assim, danos materiais à população.

Nesse contexto, é imprescindível que as áreas sujeitas a inundações e alagamentos sejam devidamente identificadas e mapeadas nos planos municipais, com destaque para o PD, de forma a impedir sua ocupação inadequada. Dessa maneira, os órgãos públicos e a população podem se preparar para as diferentes fases de um evento crítico — antes, durante e depois — com base nas áreas de risco de inundação (FRUTUOSO *et al.*, 2020).

Conforme Silva (2018), as avaliações de risco, bem como as estratégias para mitigar riscos previsíveis, devem ter uma função essencial no contexto do planejamento urbano. Além disso, é fundamental que as cidades assegurem que suas decisões de investimento e desenvolvimento contribuam para fortalecer a resiliência urbana, em vez de enfraquecê-la.

Em relação aos eventos extremos de inundações, segundo Graciosa e Mendiondo (2007), existem quatro estágios da gestão de risco: antes, durante, e após o evento e mitigação (Figura 8). Essas ações visam reduzir o dano causado por inundações por meio da redução da exposição, vulnerabilidade e ameaça. Quando se trata de dano, entende-se a gravidade das perdas humanas, material ou ambiente que é destruído por um desastre.



Figura 8: Etapas da gestão de risco de inundações
 Fonte: Adaptado Graciosa e Mendiondo (2007)

Para enfrentar tais desafios dos eventos extremos hidrológicos é necessário um sistema resiliente que exige a presença de agentes e instituições capazes de promover adaptações em suas estruturas e processos. Essas adaptações envolvem mudanças nas regras e instituições que governam as interações entre agentes e recursos, afetando diretamente a gestão do sistema social. A governança adaptativa é essencial para fornecer mecanismos flexíveis de controle interno e adotar uma abordagem proativa para a resiliência (BRASIL, 2007).

Para Silva (2018), a construção de cidades resilientes tornou-se uma prioridade no início do século XXI, impulsionada pela crescente necessidade de enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela urbanização desordenada. Organizações internacionais têm desempenhado um papel fundamental na promoção dessa agenda, incentivando a adoção de estratégias que fortaleçam a resiliência urbana. Uma cidade resiliente é aquela capaz de se adaptar e se reorganizar diante de adversidades, mantendo suas funções essenciais e minimizando os impactos negativos em suas estruturas sociais, econômicas e ambientais.

As ações para conter as inundações são categorizadas em estruturais e não estruturais. Medidas estruturais são aquelas que modificam o sistema fluvial por meio de estruturas hidráulicas, com o objetivo de reduzir os danos causadas pelas cheias. As medidas não-estruturais, por sua vez, são aquelas que visam uma melhor convivência da população com os riscos de cheias, não exigindo modificações estruturais do sistema fluvial. Segundo Naghettini (1999), seria incorreto pensar que as ações humanas poderiam controlar completamente as cheias, uma vez que se busca minimizar os seus efeitos.

2.6 Estatística hidrológica

A intensidade da manifestação dos fenômenos hidrológicos apresenta variabilidade significativa ao longo do tempo e espaço, influenciada por variações climáticas globais e regionais, bem como por fatores locais, como características meteorológicas, geomorfológicas e o uso do solo. Essa diversidade de intensidades torna a análise desses fenômenos complexa e multifacetada. Os processos hidrológicos, que envolvem o ciclo da água, podem ser determinísticos ou estocásticos (ou a combinação de ambos), refletindo tanto padrões regulares como elementos aleatórios, como as estações do ano ou variações da radiação solar (NAGHETTINI e PINTO, 2007; COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

Grande parte dos processos hidrológicos é considerada estocástica, governada por leis de probabilidades. Isso ocorre porque esses processos, como precipitação, evapotranspiração e escoamento, apresentam componentes aleatórias que se sobrepõem a regularidades previsíveis. A aleatoriedade é especialmente relevante em eventos como enchentes, nos quais muitos fatores causais não podem ser precisamente definidos (NAGHETTINI e PINTO, 2007)

As variáveis hidrológicas, como o número de dias sem precipitação ou a intensidade máxima de chuvas, são utilizadas para descrever as variações temporais e espaciais desses fenômenos. A hidrologia estatística busca extrair conclusões a partir dessas variáveis, como estimar a probabilidade de um determinado evento hidrológico atingir ou superar um valor de referência (NAGHETTINI e PINTO, 2007).

As séries hidrológicas, que registram os fenômenos ao longo do tempo, podem apresentar tendências, saltos ou periodicidades devido a variações climáticas ou interferências humanas. Para a correta aplicação da hidrologia estatística, essas séries devem ser estacionárias e homogêneas, ou seja, com padrões de variabilidade consistentes ao longo do tempo (NAGHETTINI e PINTO, 2007).

A precisão na quantificação dos fenômenos hidrológicos depende da coleta sistemática de dados ao longo do tempo e espaço. Esses dados, como registros pluviométricos e fluviométricos, são essenciais para respostas mais corretas a problemas de hidrologia aplicada, sendo tanto mais eficazes quanto maior e mais detalhada for a amostra disponível (NAGHETTINI e PINTO, 2007).

As análises exploratórias de dados hidrológicos são realizadas normalmente com o objetivo de identificar padrões dos fenômenos hidrológico, sendo geralmente apresentada através de gráficos e tabelas. A seguir destaca-se algumas descrições estatística das variáveis hidrológicas.

- **Histograma:** é um gráfico de barras verticais que apresenta as frequências relativas ou absolutas de uma determinada variável (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013), conforme exemplo da Figura 9.

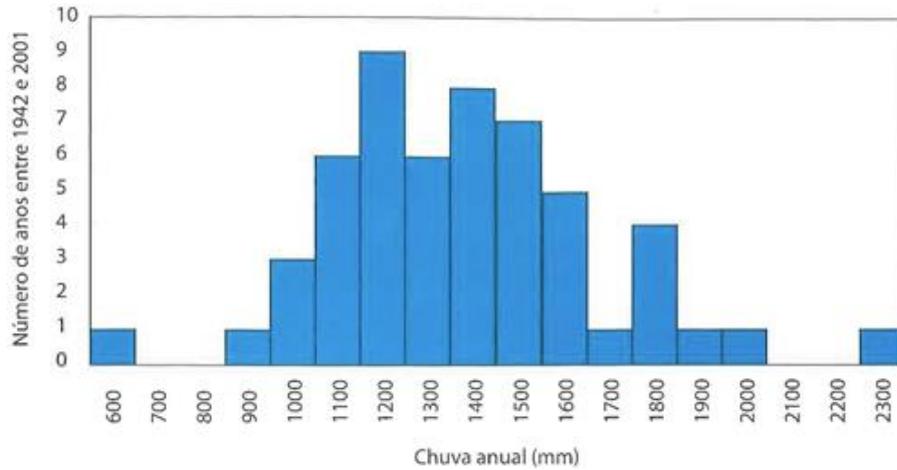


Figura 9: Histograma de frequência de chuvas anuais para uma estação pluviométrica. Fonte: Collischonn e Dornelles (2013)

- **Curva de Permanência:** é um gráfico que expressa a relação entre a vazão e a frequência, estimada empiricamente, com que uma determinada vazão é igualada ou superada. É uma importante análise estatística da hidrologia (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013), a Figura 10 apresenta um exemplo de curva de permanência.

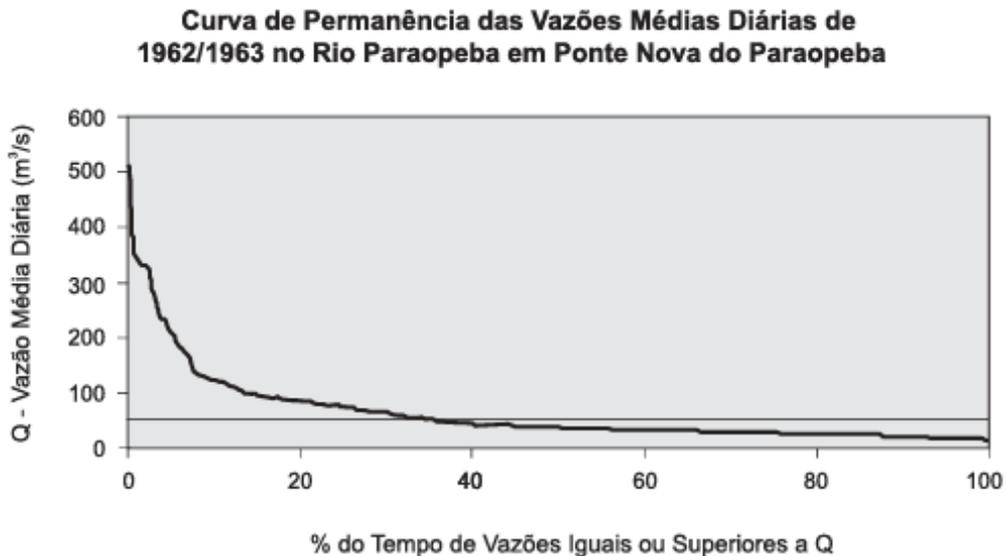


Figura 10: Exemplo de Curva de Permanência. Fonte: Naghettini e Pinto (2007)

- **Hidrograma:** é a representação gráfico da vazão que passa em um determinado ponto de controle ou seção, em um determinado tempo, ou seja, relaciona vazão com tempo (NAGHETTINI e PINTO, 2007). A Figura 11 apresenta um exemplo de hidrograma.

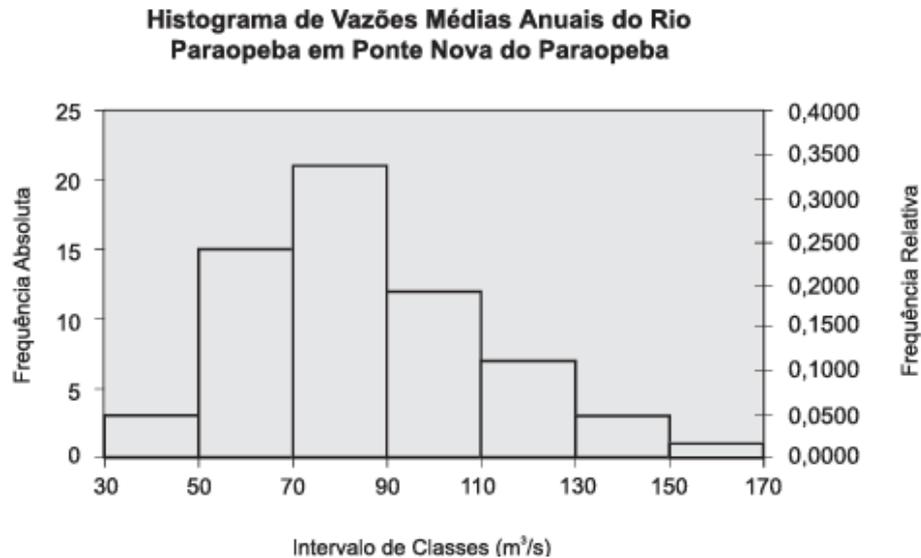


Figura 11: Exemplo de um hidrograma de Vazões Médias Anuais
Fonte: Naghettini e Pinto (2007)

2.6.1 Análise de frequência de eventos hidrológicos extremos

De acordo com Collischonn e Dornelles (2013), a análise de frequência de eventos hidrológicos extremos tem como objetivo estimar a probabilidades de ocorrência de valores acima ou abaixo de um valor de referência. Para essa análise normalmente analisa-se séries temporais de uma determinada variável, buscando os máximos e mínimos valores de cada ano, e posteriormente trabalha-se esses valores encontrados, conforme Figura 12 .

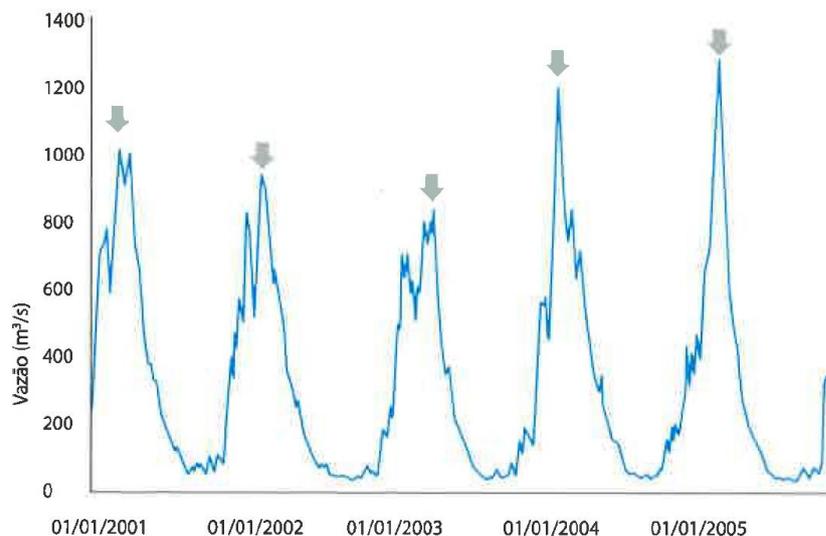


Figura 12: Identificação de valores máximo anual de vazão para análise de frequência de vazões máximas
Fonte: Collischonn e Dornelles (2013)

Conforme Naghettini e Pinto (2007), um modelo de distribuição de probabilidades é uma representação matemática abstrata que, devido à sua variabilidade intrínseca e conformação, é capaz de descrever de maneira concisa as possíveis variações de uma variável aleatória. Esse tipo de modelo é caracterizado por ser paramétrico, ou seja, definido por parâmetros matemáticos cujos valores numéricos especificam o modelo para uma amostra de observações de determinada variável aleatória. Após a estimativa dos parâmetros, o modelo de distribuição de probabilidades pode representar de forma aceitável o comportamento de uma variável aleatória, permitindo a interpolação ou extrapolação de probabilidades e quantis não presentes na amostra original.

Na análise das vazões máximas e mínimas, Collischonn e Dornelles (2013) afirma que a definição do ano hidrológico é importante. No contexto hidrológico, o ano não necessariamente coincide com o ano-calendário (janeiro a dezembro). Ele é escolhido de acordo com o início da estação chuvosa até o fim de período seco, facilitando a análise de eventos como precipitação, escoamento superficial e enchentes.

Kich e Metali (2015), descrevem o ano como um período contínuo de doze meses que abrange um ciclo climático completo, permitindo uma comparação mais consistente e significativa dos dados meteorológicos e hidrológicos.

Essa definição é especialmente importante para áreas com sazonalidade marcante, como o Acre, onde o ciclo das chuvas e secas tem grande impacto sobre os recursos hídricos, conforme estudo de Duarte (2011), o período chuvoso inicia-se em setembro, como pode ser observado na Figura 13.

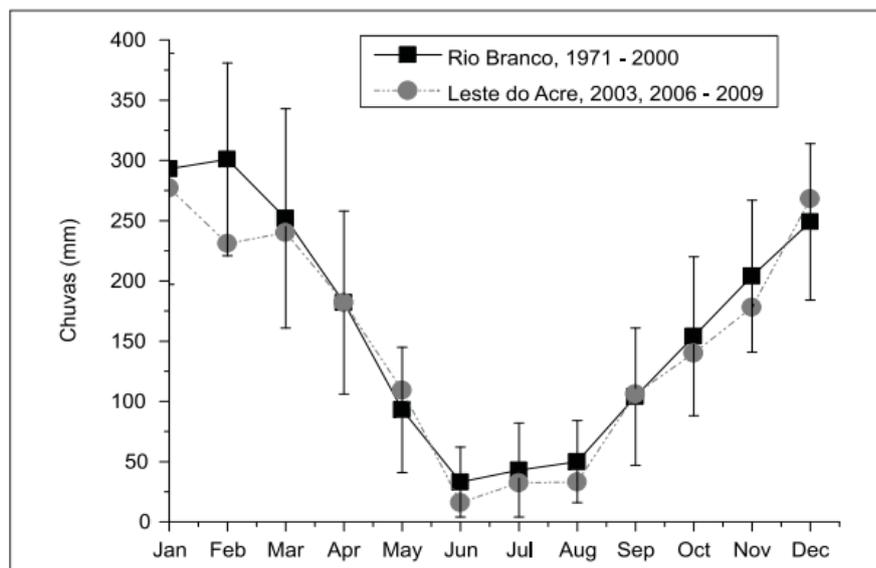


Figura 13: Pluviometria de diferentes locais da bacia do Rio Acre
Fonte: Duarte, 2011

Na Figura 14, verifica-se o gráfico do regime de chuvas apresentando pelo Plano Estadual de Recursos Hídricos, onde colabora com as informações extraídas do artigo de Duarte (2011).

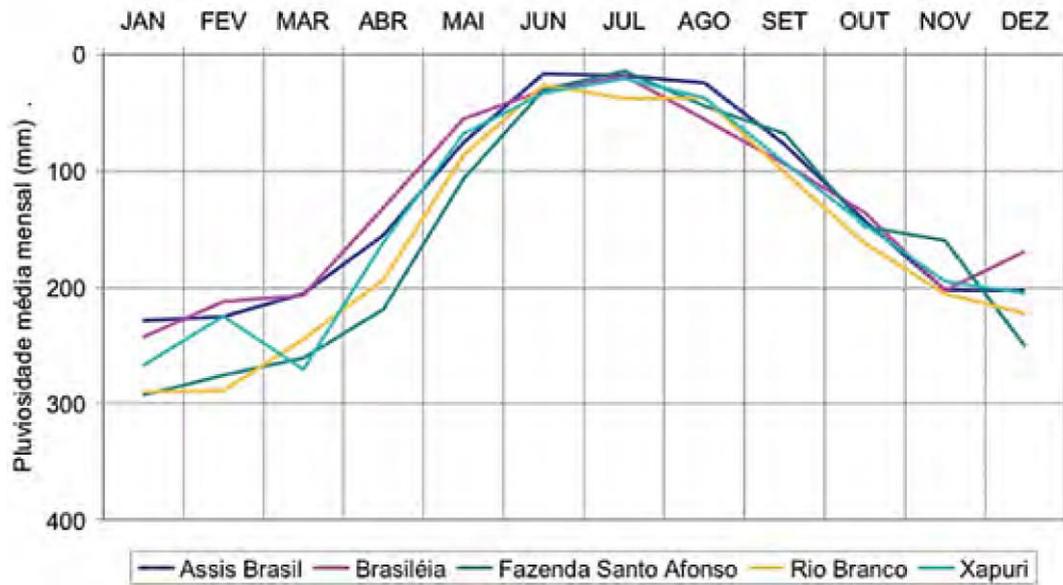


Figura 14: Regime chuvas na Bacia do Rio Acre
Fonte: Acre, 2012

2.6.2 Probabilidade e tempo de retorno de eventos extremos

Para a análise de vazões máximas, é importante compreender a probabilidade de excedência e de tempo de retorno de uma determinada vazão. Assim para o caso de vazões máximas, Collischonn e Dornelles (2013), define:

Probabilidade anual de excedência (P): é probabilidade de uma determinada vazão de referência seja igualada ou superada em um ano qualquer.

Tempo de retorno (TR): é o intervalo médio de tempo, em anos, que ocorre entre duas ocorrências subsequentes de uma vazão de referência seja igualada ou superada. O tempo de retorno é o inverso da probabilidade, sendo expresso pela seguinte equação:

$$TR = \frac{1}{P} \quad (3)$$

Conforme Naghettini e Pinto (2007) o tempo de retorno não pode ser confundido com o "tempo cronológico" específico, pois o TR representa uma medida de tendência central dos "tempos cronológicos", também chamados de *tempos de recorrência*. Esse conceito é usado para expressar a frequência com que um determinado evento, como uma enchente ou uma tempestade, pode ser esperado em um intervalo de tempo. Assim, o tempo de retorno é uma média estatística e não uma previsão exata de quando um evento ocorrerá.

Na hidrologia, o tempo de retorno é utilizado com frequência nas análises probabilística de eventos máximos como enchentes ou alturas diárias de precipitações máximas anuais, tais variáveis aleatórias são contínuas, logo seu comportamento pode ser definido por funções de densidade probabilística, conforme demonstrado na Figura 15.

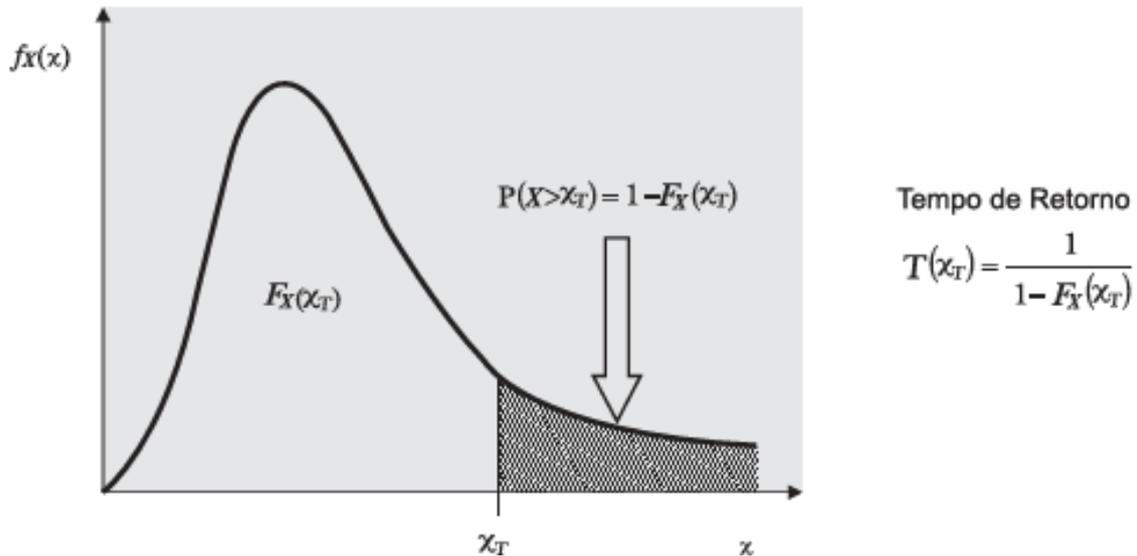


Figura 15: Ilustração do conceito de tempo de retorno para eventos máximos
Fonte: Naghettini e Pinto (2007)

2.6.3 Riscos Hidrológicos

Juntamente com o conceito de tempo de retorno é importante compreender a definição de risco hidrológico, que é o termo utilizado para descrever a possibilidade de ocorrência de eventos relacionados fenômenos hidrológicos que podem causar danos ou prejuízos, este conceito é amplamente aplicado no planejamento de estruturas hidráulicas de controle de cheias (NAGHETTINI E PINTO, 2007).

Considerando um quantil de referência X_{TR} , associado a um tempo de retorno TR , o risco hidrológico é a probabilidade de que seja igualado ou superado ao menos uma vez em um período de N anos (NAGHETTINI E PINTO, 2007). Geralmente, o quantil de referência X_{TR} representa a cheia projetada para a estrutura hidráulica, enquanto N corresponde à sua vida útil, conforme ilustrado na Figura 16.

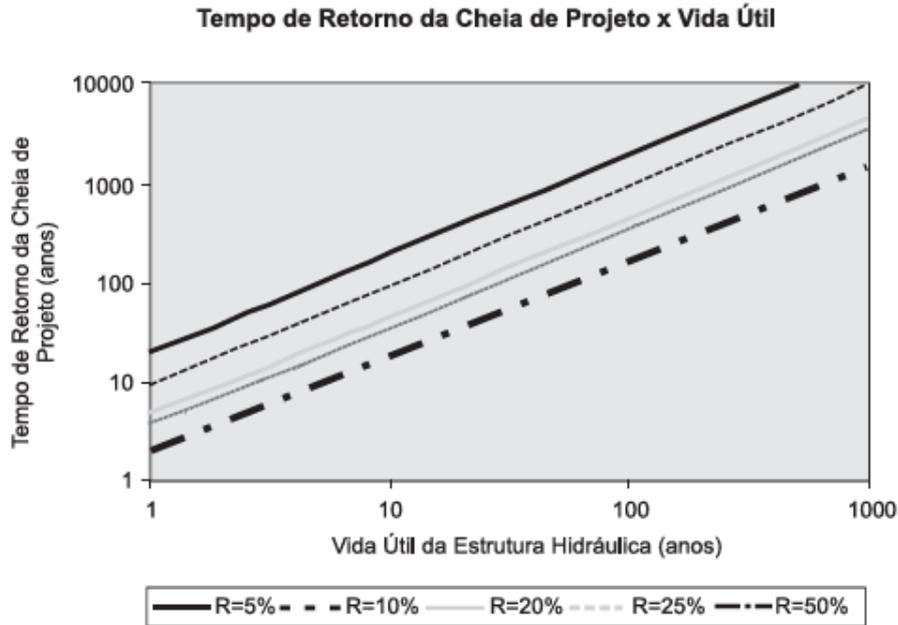


Figura 16: Termo de retorno de cheia de projeto em função do risco hidrológico e a vida útil estimada para uma estrutura hidráulica
 Fonte: Fonte: Naghettini e Pinto (2007)

Quando o risco hidrológico é previamente estabelecido com base na importância e nas dimensões da estrutura, assim como nas possíveis consequências de seu colapso para as comunidades ribeirinhas ou aquelas situadas a jusante, pode-se utilizar a equação abaixo para calcular o tempo de retorno necessário (NAGHETTINI e PINTO, 2007).

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{TR}\right)^N \quad (4)$$

Esse cálculo é crucial para dimensionar adequadamente a cheia de projeto de estruturas como uma barragem, considerando sua vida útil estimada em N anos.

2.6.4 Análise de frequência empírica de vazões máximas

Ao selecionar as maiores vazões anuais de um determinado local, é possível gerar uma série histórica de vazões máximas, que permite a condução de análises estatísticas para relacionar essas vazões com suas respectivas probabilidades de ocorrência. Contudo, a maioria das séries disponíveis em postos fluviométricos são relativamente curtas, geralmente abrangendo apenas algumas décadas de dados (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

Ainda de acordo com o mesmo autor, na análise empírica de frequência de vazões máximas, as probabilidades são estimadas para cada valor observado, após os dados terem sido organizados em ordem decrescente, isto é, da maior para a menor vazão máxima. Essa abordagem facilita a análise estatística da frequência com que certos valores de vazão são

excedidos, fornecendo subsídios importantes para o dimensionamento de infraestruturas hidráulicas e o gerenciamento dos recursos hídricos.

Conforme Naghettini e Pinto (2007) e Collischonn e Dornelles (2013) a análise probabilística dos valores de vazão serem igualados ou superados pode ser feita a partir do valor correspondente de m (posição em que este valor ocorre na ordem decrescente e do tamanho da amostra (N)). Os dois autores apresentam diversas fórmulas para estimar a probabilidade empírica de excedência, para este trabalho, será destacado a equação de *Weibull*, expressa abaixo.

$$P = \frac{m}{N + 1} \quad (5)$$

Collischonn e Dornelles (2013) ressalta que o problema de estimar a probabilidade empírica é que esta limita o tempo de retorno em função a quantidade de anos de dados observados.

2.6.5 Análise de frequência de vazões máximas com base em distribuições teóricas

A fim de permitir a extrapolação para tempo de retornos maiores normalmente as vazões são estimadas que sigam uma determinada distribuição teórica (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013). Dessa forma, para o presente trabalho serão abordadas algumas distribuições de probabilidade que são utilizadas comumente para análise de vazões máximas.

- **Distribuição log-normal**

Conforme Collischonn e Dornelles (2013), nesta distribuição considera-se que apesar dos valores de vazões máximas não sigam uma distribuição normal, os logaritmos desses valores podem ser aproximados por uma distribuição normal. Esta distribuição é expressa pela equação abaixo:

$$\log(x) = \overline{\log(x)} + k * s_{\log x} \quad (6)$$

Onde:

$\log(x)$ é o logaritmo da vazão máxima;

$\overline{\log(x)}$ é a média dos logaritmos das vazões máximas anuais observadas;

$s_{\log x}$ é o desvio padrão dos logaritmos das vazões máximas anuais observada;

K é o valor do fator de frequência.

Observação: o valor de K é obtido nas tabelas A e B no final do Capítulo 14 do livro Collischonn e Dornelles (2013).

- **Distribuição de Gumbel**

De acordo com Collischonn e Dornelles (2013) a distribuição de Gumbel considera a seguinte equação para estimas a vazão para um determinado tempo de retorno:

$$x = \bar{x} - s * \left\{ 0,45 + 0,7797 * \ln \left[\ln \left(\frac{TR}{TR - 1} \right) \right] \right\} \quad (7)$$

Onde:

x é o valor da vazão mázima desejada;

TR é o tempo de retorno em anos;

s é o desvio padrão das vazões máximas anuais;

\bar{x} é a média das vazões máximas anuais.

- **Distribuição Log-Pearson Tipo III**

Conforme Collischonn e Dornelles (2013), esta distribuição pode ser descrita através de três parâmetros, a saber: média, desvio padrão e o coeficiente de assimetria. A equação utilizada nesta distribuição é expressa abaixo.

$$\log(x) = (\log(x))^- + K_{(T,G)} * s_{\log x} \quad (8)$$

Onde:

$K_{(T,G)}$ depende do coeficiente de assimetria;

Observação: o valor de K pode ser obtido na tabela C no final do Capítulo 14 do livro Collischonn e Dornelles (2013).

2.7 Métodos para estimativa de Cheias de Projeto

A caracterização dos eventos de cheia apresenta um nível considerável de complexidade, conforme apontado por Gontijo (2007), em razão da natureza multifacetada deste fenômeno e dos múltiplos fatores que nele atuam. Entre as variáveis hidrológicas que permitem a descrição do comportamento de uma bacia hidrográfica, destacam-se a capacidade de infiltração, a porcentagem de escoamento básico, a descarga superficial, o tempo de armazenamento de água na superfície e o índice de umidade do solo.

De acordo com Naghettini (1999) a definição de métodos para a estimativa de cheias de projeto deve levar em consideração a fase em que o projeto se encontra, a disponibilidade de

dados e as condições hidrológicas específicas da bacia hidrográfica. A magnitude de uma cheia pode ser analisada sob duas perspectivas: a previsão de vazões a curto prazo e a pré-determinação de vazões a longo prazo.

A previsão de vazões a curto prazo consiste em determinar não apenas a magnitude da cheia, mas também quando ela ocorrerá. Este método é aplicado em cenários onde há uma necessidade imediata de monitoramento e controle de eventos hidrológicos. Já a pré-determinação de vazões, utilizada em análises de longo prazo, não define a data exata de ocorrência de uma cheia, mas sim a probabilidade de excedência de determinado evento. Essa abordagem é fundamental para o planejamento de obras hidráulicas e a gestão de recursos hídricos, especialmente em grandes barragens (NAGHETTINI, 1999).

De acordo com Collischonn e Dornelles (2013) os métodos para estimativa de vazões máximas a partir da chuva dependem do tamanho da bacia. Pequenas bacias hidrográficas, como as encontradas em áreas urbanas, raramente possuem dados observados de vazão e nível de água. Isso impede a aplicação de métodos estatísticos baseados em séries históricas de vazão, como os descritos em outros estudos. Para contornar essa limitação, é comum o uso de métodos alternativos, como método racional. Para bacias maiores, são normalmente empregados modelos mais complexos de transformação chuva-vazão. Esses modelos, que geralmente se baseiam em cálculos de chuva efetiva, como discutido em métodos anteriores, e no uso do hidrograma unitário, são mais adequados para representar o comportamento hidrológico de bacias maiores.

Esses métodos de estimativa de vazões máximas a partir de dados de precipitação são especialmente relevantes em bacias urbanas ou em processo de urbanização. Eles permitem prever vazões máximas sob diferentes cenários de desenvolvimento, considerando graus variados de urbanização, o que é fundamental para o planejamento urbano e a gestão de riscos de inundações (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

A disponibilidade de dados hidrológicos possibilita a aplicação de distintos métodos para quantificação do escoamento superficial. Os métodos de determinação de cheias podem ser classificados em diretos, que se baseiam exclusivamente em registros fluviométricos, e indiretos, que utilizam dados pluviométricos para a construção de chuvas de projeto, além de técnicas de transformação chuva-vazão.

- **Métodos Diretos**

De acordo com Macedo (2010.), os métodos diretos são definidos como aqueles que se baseiam exclusivamente em registros fluviométricos coletados na bacia hidrográfica para estimar as vazões de projeto, utilizando distribuições estatísticas de probabilidade. Esse tipo de abordagem envolve a análise da distribuição de frequência, a qual requer o armazenamento de dados históricos de precipitação. Nesse contexto, as estações fluviométricas constituem ferramentas fundamentais para a coleta e análise dessas informações, desempenhando um papel crucial no processo de estimativa das vazões.

- **Métodos Indiretos**

Este método é particularmente relevante em regiões onde não há medições disponíveis de vazões ou onde esses dados são limitados. A estimativa de vazão é feita por meio da análise das características fisiográficas e morfológicas de uma determinada bacia hidrográfica. Entre os métodos indiretos mais utilizados para essa finalidade, destaca-se o método do hidrograma unitário, amplamente aplicado em modelagens hidrológicas para representar a resposta de uma bacia a eventos de precipitação (NAGHETTINI, 1999).

Ainda de acordo com Naghettini (1999), os métodos indiretos utilização de observações meteorológicas e dados pluviométricos disponíveis para uma determinada região, com o objetivo de gerar a chamada chuva de projeto. No caso de grandes barragens, essa chuva de projeto é calculada para resultar na "Precipitação Máxima Provável" (PMP). Na sequência do método, emprega-se uma técnica de conversão chuva-vazão, como o hidrograma unitário ou um modelo conceitual de simulação hidrológica, para determinar a "Enchente Máxima Provável" (EMP) a partir da PMP.

2.8 Modelos de transformação chuva-vazão

Conforme Gontijo (2007), devido à maior disponibilidade de dados pluviométricos em comparação com os dados fluviométricos, torna-se evidente a utilidade de um modelo chuva-vazão, que permite calcular a vazão de uma bacia hidrográfica com base na precipitação. No contexto de chuvas de projeto, as vazões simuladas por esses modelos servem como estimativas das cheias de projeto.

O principal objetivo dos modelos chuva-vazão é prever a resposta de uma bacia hidrográfica em termos de vazão, considerando uma determinada precipitação. Esses modelos são capazes de estimar, a partir dos dados de chuva, as perdas por evaporação, interceptação, infiltração e percolação da água subterrânea, além de calcular o escoamento superficial e o escoamento de base (GONTIJO, 2007).

De acordo com Collischonn e Dornelles (2013), os métodos para estimativa de vazões máximas a partir de chuvas podem ser aplicados tanto a eventos de precipitação observados quanto a eventos idealizados, conhecidos como chuvas de projeto. No entanto, a aplicação mais comum envolve o uso dessas chuvas idealizadas. Esses eventos são planejados para representar condições específicas de precipitação e são amplamente utilizados em estudos hidrológicos e de engenharia para prever escoamentos máximos.

Uma chuva de projeto está associada a um tempo de retorno, que indica a probabilidade de um evento semelhante ocorrer em um ano específico. O tempo de retorno da vazão máxima gerada por essa chuva é considerado o mesmo que o tempo de retorno da própria chuva (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

2.8.1 Curva IDF

As chuvas de projeto são comumente derivadas das curvas de intensidade, duração e frequência (IDF), obtidas através de análises estatísticas de chuvas intensas registradas por pluviógrafos ou pela desagregação de dados de pluviômetros em durações inferiores a 24 horas. As principais características dessas chuvas são sua duração, intensidade média e a distribuição temporal da precipitação, sendo todos esses fatores cruciais para a modelagem hidrológica precisa (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

Conforme Naghettini (1999) e Collischonn e Dornelles (2013), a equação única da forma que expressa a curva IDF é a seguinte:

$$i = \frac{aTR^b}{(t_d + c)^d} \quad (9)$$

Onde i é a intensidade em mm/h , t_d é a duração da precipitação em minutos, TR é o tempo de retorno em anos, a , b , c e d são parâmetros a serem estimados com base nos dados pluviográficos de cada local.

A partir das variáveis da expressão, conclui-se que as curvas IDF são diferentes para cada local. No Brasil, o Serviço Geológico do Brasil, disponibiliza as equações de IDF para algumas regiões do país, conforme pode ser acessado no site <https://www.sgb.gov.br/equacoes-idf>.

A definição da duração da chuva (t_d) é realizada com base no tempo de concentração da bacia hidrográfica, a intensidade da chuva é obtida através da curva IDF para um determinado tempo de retorno. Este por sua vez, depende das características do projeto e dos

potenciais prejuízos que traria uma eventual falha causada pela excedência da vazão utilizada para o dimensionamento da estrutura hidráulica (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

Conforme Collischonn e Dornelles (2013), as bacias hidrográficas grandes apresentam uma menor chance de serem afetadas por chuvas intensas de forma simultânea em toda a sua extensão em comparação com bacias menores. As chuvas de projeto são determinadas com base em informações obtidas de pluviógrafos ou pluviômetros, cuja área de coleta é bastante restrita. Esses dados fornecem estimativas pontuais da precipitação.

Para calcular as chuvas de projeto em bacias de tamanho considerável, é necessário levar em conta que a intensidade média das chuvas em áreas amplas tende a ser inferior. Para isso, geralmente se utiliza um fator de redução, que está associado à área da bacia e à duração da precipitação. Esse tipo de fator é obtido de maneira empírica, a partir de dados coletados de um grande número de pluviógrafos situados em uma mesma localidade. Chuvas de curta duração, que costumam ser mais localizadas, devem ser ajustadas por um fator mais elevado, enquanto chuvas de longa duração requerem uma redução menor (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

Os métodos mais comuns para calcular as vazões máximas a partir da transformação chuva-vazão são o método racional e os modelos baseados no hidrograma unitário. Para Collischonn e Dornelles (2013), em bacias pequenas são usados comumente o método racional, já nas bacias maiores é necessário utilizar modelos baseados no hidrograma unitário.

2.8.2 Método Racional

O método racional é comumente utilizado por ser um método simples, sendo utilizado quando não se dispões de dados para uso de outros métodos. É expresso pela equação abaixo:

$$Q = \frac{C * i * A}{3,6} \quad (10)$$

Onde:

Q é a vazão máxima (m^3/s);

C é o coeficiente de escoamento superficial;

i é a intensidade da chuva de projeto (mm/hora);

A é a área da bacia hidrográfica (km^2);

Para obtenção da área de drenagem pode ser utilizado mapas, modelos digitais de terreno e elevação, bem como levantamentos topográficos. O coeficiente de escoamento varia de acordo com as condições de uso e ocupação do solo (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

2.8.3 Hidrograma Unitário

De acordo com Collischonn e Dornelles (2013), a bacia hidrográfica pode ser imaginada como um sistema que transforma chuva em vazão, nessa transformação ocorre alterações do volume de água uma vez parte da água da chuva infiltra para o subsolo e retorna para atmosfera através da evapotranspiração. A parcela da chuva que esco superficialmente é considerada chuva efetiva, sendo esta responsável pelo aumento rápido da vazão do rio durante a chuva, conforme mostra a Figura 17.

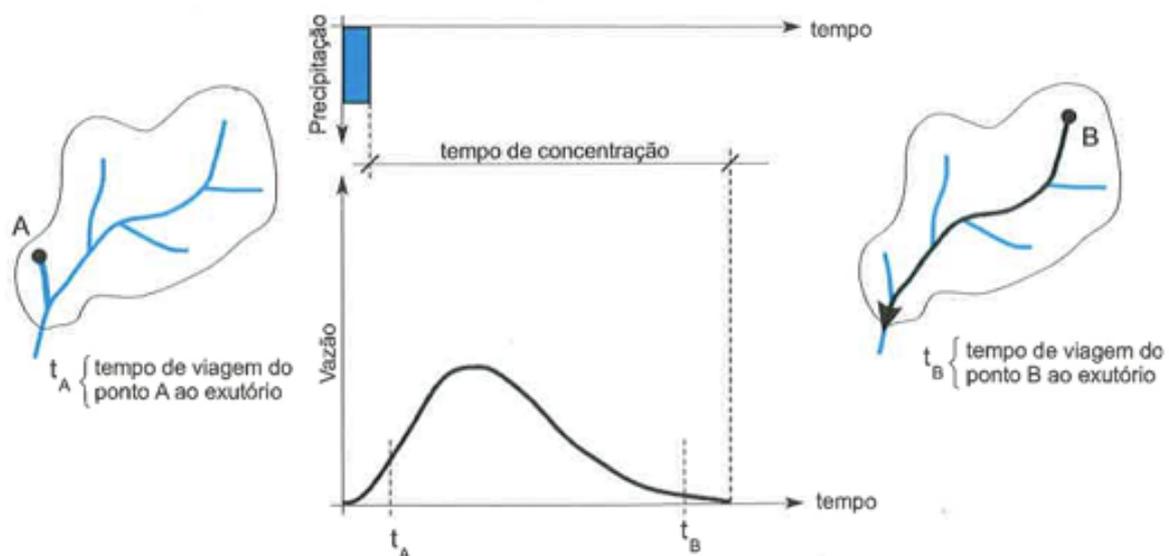


Figura 17: Resposta de uma bacia hidrográfica a um evento de chuva de curta duração
Fonte: Collischonn e Dornelles (2013)

Conforme Naghettini (1999), uma teoria utilizada para esta análise é do Hidrograma Unitário, proposta por Sherman, que é baseado na hipótese de que uma vez que as características físicas da bacia não se alterem, precipitações semelhantes produzirão hidrogramas semelhantes, ou seja seria o hidrograma típico para a bacia.

O Hidrograma Unitário (HU) é o hidrograma do escoamento direto causado por uma chuva efetiva. É chamado unitário porque suas ordenadas estão divididas por 1 mm (1 cm ou 1 pol) de chuva efetiva. Por considerar que a bacia tem um comportamento linear, nesta teoria, considera-se os princípios da proporcionalidade, linearidade e independência de eventos (NAGHETTINI, 1999; COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

- **Proporcionalidade**

De acordo com Naghettini (1999) e Collischonn e Dornelles (2013), neste princípio para uma chuva efetiva com uma dada duração, o volume de chuva efetiva, é proporcional à intensidade dessa chuva, conforme demonstrado na Figura 18.

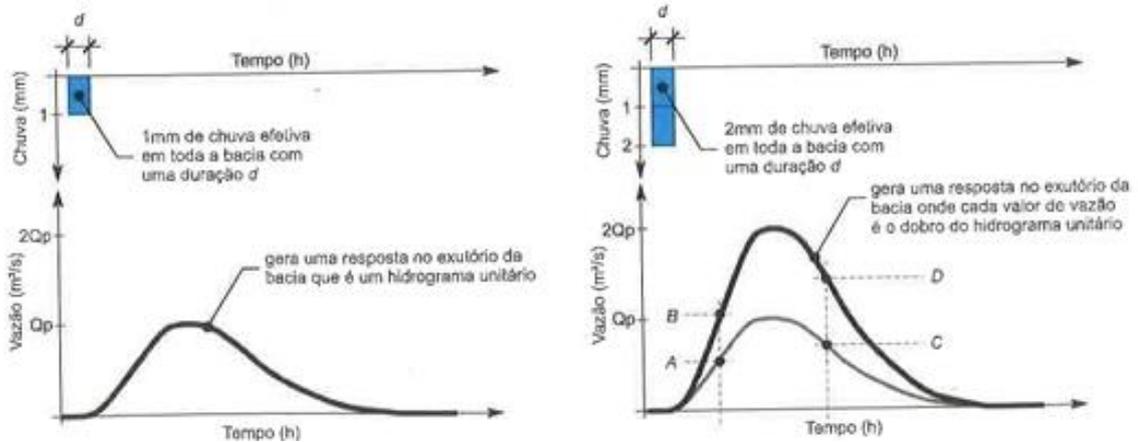


Figura 18: Princípio da proporcionalidade da teoria do hidrograma unitário
 Fonte: Collischonn e Dornelles (2013)

- **Constância do tempo de base**

Neste princípio considera-se que as chuvas efetivas de igual duração, apresentaram durações de escoamento superficiais iguais, conforme observado na Figura 19 (GONTIJO, 2007).

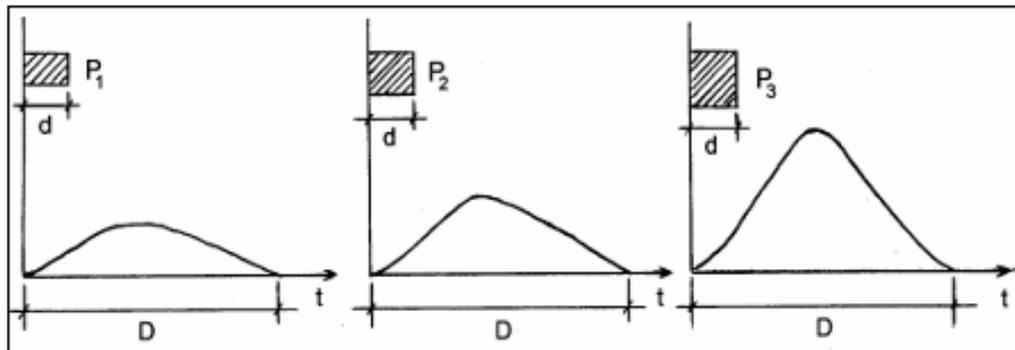


Figura 19: Princípio da Constância de Tempo de Base
 Fonte: Gontijo, 2007.

- **Constância da Independência de Eventos**

A duração do escoamento superficial de uma determinada chuva efetiva não é influenciado pelas precipitações anteriores, conforme Figura 20 (GONTIJO, 2007).

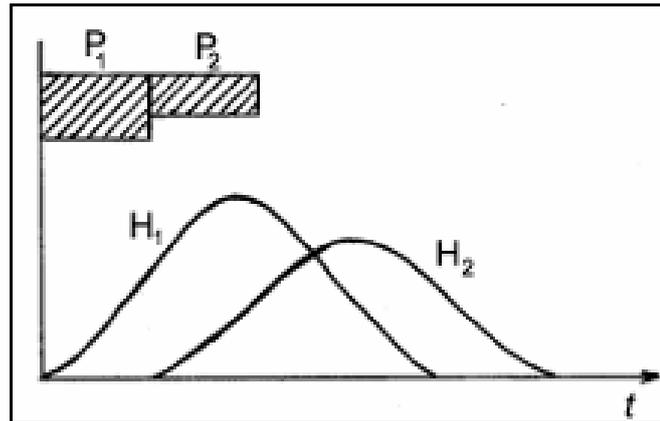


Figura 20: Princípio da Independência de Eventos
Fonte: Gontijo, 2007

- **Superposição**

De acordo com Collischonn e Dornelles (2013) este princípio considera que o hidrograma de escoamento superficial gerado por chuvas sucessivas pode ser obtido pela soma das vazões dos hidrogramas unitários correspondentes as chuvas efetivas individuais, conforme ilustrado na Figura 21.

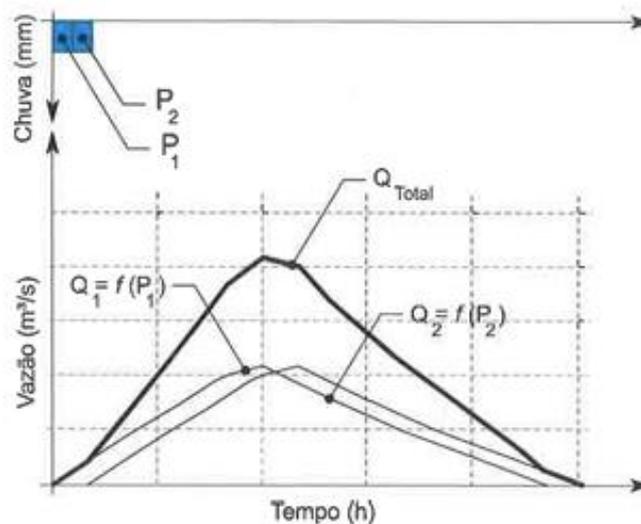


Figura 21: Princípio da Superposição de hidrogramas
Fonte: Collischonn e Dornelles (2013)

Ao considerar os princípios da proporcionalidade e da superposição é possível calcular os hidrogramas resultantes de eventos complexos, este cálculo é realizado através da convolução (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

2.8.3.1 Hidrograma Unitário Sintético

É comum nas análises hidrológicas dificuldades devidas o problema da falta de dados, o que impede de determinar Hidrograma Unitário de numa determinada bacia. Neste caso podem ser utilizados hidrogramas unitários sintéticos (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

De acordo com Portela (2006), o hidrograma unitário sintético é o resultado de dados hidrográficos unitários com as características físicas de uma bacia. Ou seja, trata-se de alinhar esses dois elementos para conseguir um resultado mais completo. A seguir, na Figura 22, apresenta-se as componentes do Hidrograma Unitário Sintético.

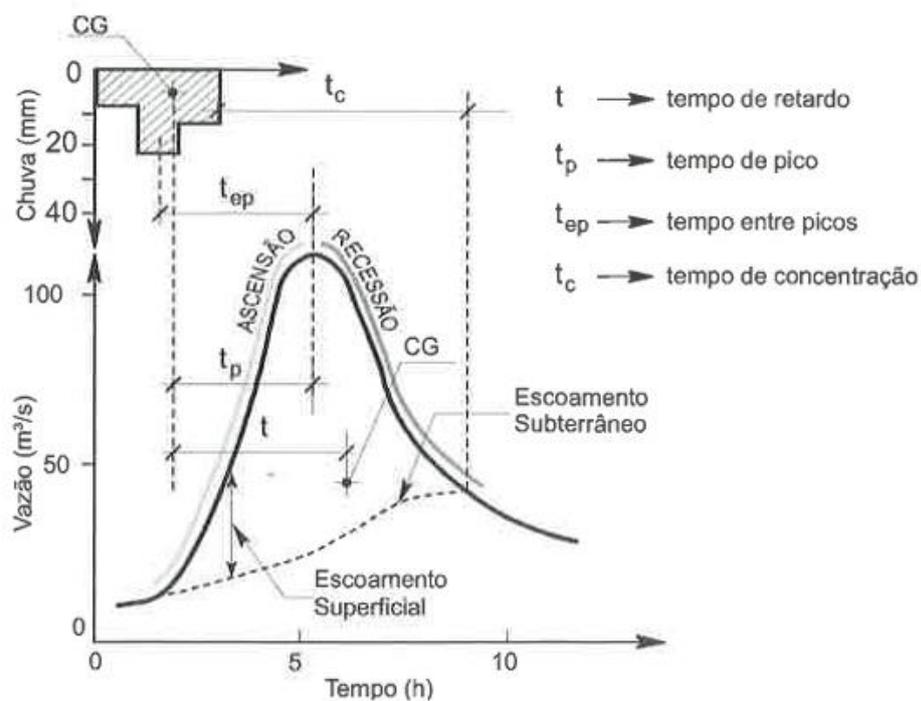


Figura 22: Características do Hidrograma para definição do Hidrograma Unitário Sintético
Fonte: Collischonn e Dornelles (2013)

2.8.4 Método SCS-CN

Para obter o hidrograma da cheia de um projeto, é comum utilizar um método que calcula a precipitação efetiva, seguido de uma função de transferência, frequentemente referida como hidrograma unitário. Um dos métodos mais utilizados para calcular a precipitação efetiva é o desenvolvido pelo SCS (*Soil Conservation Service*), atualmente conhecido como NRCS (*Natural Resources Conservation Service*). O principal parâmetro desse modelo é o CN (*Curve Number*), que leva em consideração a classificação do solo, as condições de umidade prévias e a cobertura do solo. A função de transferência empregada normalmente é o hidrograma unitário

De acordo Souza, 2019, o parâmetro CN é uma variável estimada que considera os fatores discutidos anteriormente. Os valores atribuídos a ele são utilizados para calcular hietogramas de chuva excessiva, o que, por sua vez, facilita a determinação de hidrogramas. Dessa forma, é possível calcular a vazão máxima em uma área contribuinte ou bacia hidrográfica.

Os fatores que influenciam a definição do parâmetro CN incluem tipos de solo, cobertura vegetal, práticas agrícolas, condições hidrológicas e escoamento preexistente. Assim, esse parâmetro reflete as características da cobertura do solo, variando de superfícies muito permeáveis a outras totalmente impermeáveis, além de considerar solos com alta capacidade de infiltração em contraste com aqueles de baixa infiltração (POMPERMAYER, 2013).

Conforme Machado (2002), a relação entre as condições hidrológicas e a cobertura do solo envolve a interação entre o grupo hidrológico do solo (tipo de solo), o uso da terra (cobertura vegetal) e as condições de superfície (escoamento). Esses fatores influenciam diretamente a estimativa de vazão em qualquer bacia hidrográfica. Além disso, o SCS considera a umidade antecedente, que mede a umidade retida e se relaciona com o histórico de chuvas.

De acordo com Pompermyer (2013), no âmbito hidrológico, são quatro os tipos de solo segundo SCS.

- *Solo A*: solos que apresentam baixo escoamento superficial e alta infiltração, geralmente solos arenosos com pouco silte e argila, tornando-os mais permeáveis.
- *Solo B*: solos que são menos permeáveis do que os do tipo A, mas ainda arenosos e profundos, com uma permeabilidade acima da média.
- *Solo C*: esses solos geram um escoamento superficial acima da média e têm capacidade de infiltração inferior à média, apresentando uma quantidade significativa de argila e sendo pouco profundos.
- *Solo D*: composto por argilas expansivas, esses solos também são pouco profundos e têm baixa capacidade de infiltração, resultando em uma proporção elevada de escoamento superficial, o que os torna menos permeáveis.

No Brasil, a informação sobre os tipos de solo é escassa, embora já existam tentativas de correlacionar os tipos de solo do SCS com os encontrados no território brasileiro. Nesse sentido para cálculo do CN, normalmente utilizar informações generalistas, apesar destas não fornecerem o nível de detalhe necessário para a aplicação do modelo em pequenas bacias (POMPERMAYER, 2013).

2.8.5 Método Huff

O Método de Huff classifica as precipitações em quatro grupos, com cada categoria representando um intervalo de tempo igual. Essa classificação foi desenvolvida a partir de um estudo que analisou 261 eventos de chuva ao longo de 11 anos, considerando períodos de duração de 30 minutos a mais de 48 horas. Os dados foram coletados em 49 postos distribuídos em uma área de 1 mil km² (ABREU *et al.*, 2017).

Após a análise dos eventos de precipitação, é possível observar que as distribuições temporais se mostraram sujeitas a critérios de probabilidade. Essa variação permite a identificação de padrões distintos nas ocorrências de chuva. Dessa forma, as precipitações são classificadas e agrupadas conforme o quartil em que ocorreram os eventos de chuva mais intensos. Para os dados de cada quartil, é realizada uma análise estatística com o intuito de gerar curvas adimensionais de distribuição temporal, que estão associadas a uma probabilidade de excedência. Essa probabilidade indica a chance de a precipitação ultrapassar a curva adimensional correspondente a cada quartil (ABREU *et al.*, 2017).

Esse processo permite uma compreensão mais detalhada das distribuições temporais das chuvas, possibilitando uma análise precisa dos padrões de precipitação em determinada região. Essa informação é fundamental para o planejamento e gestão de recursos hídricos, além de auxiliar em estudos de impacto ambiental e urbanístico.

2.9 Modelos de propagação de escoamento

Os modelos de propagação de vazões em cursos d'água têm como objetivo central estabelecer uma relação entre o armazenamento nos segmentos fluviais e as vazões de entrada anteriores à seção de interesse, bem como as vazões de saída, por meio da análise dos hidrogramas a montante e a jusante (COLLISCHON; DORNELLES, 2013). A implementação desses modelos enfrenta desafios significativos devido à ampla diversidade espacial das bacias hidrográficas, uma vez que as características variam consideravelmente entre diferentes locais, dificultando, assim, o detalhamento do escoamento superficial.

Ao se propagar para jusante, as ondas de cheia são influenciadas por dois fenômenos distintos: a translação, caracterizada pelo chamado “escoamento uniformemente progressivo”, e a atenuação decorrente do armazenamento, conforme ilustrado na Figura 24.

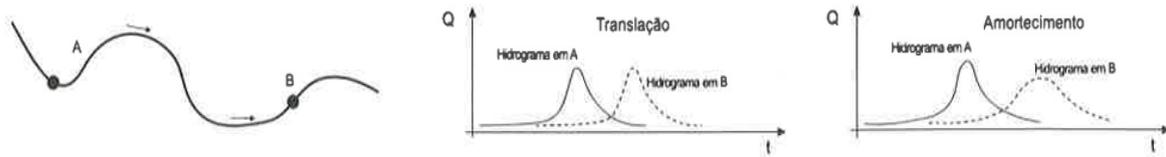


Figura 24: Efeitos da translação e amortecimento durante a propagação de uma onda de cheia de um rio
 Fonte: Collischonn e Dornelles (2013)

O escoamento uniformemente progressivo refere-se ao movimento da onda de cheia para jusante, sem alteração de sua forma original; este fenômeno ocorre exclusivamente em canais prismáticos, sob condições ideais em que a cota e a descarga permanecem constantes em todos os trechos do rio. Por outro lado, a atenuação se refere à modificação da forma da onda devido ao armazenamento de seu volume no leito fluvial. Em canais naturais, a propagação da onda de cheia geralmente encontra-se em um estado intermediário entre essas duas condições, sendo a predominância de uma ou outra dependente das particularidades de cada caso (NAGHETTINI, 1999).

Conforme Collischonn e Dornelles (2013), além da translação e da atenuação, a onda de cheia geralmente aumenta de montante para jusante devido às contribuições dos afluentes. Em rios localizados em áreas planas, outros fenômenos podem ocorrer, como os efeitos de jusante, onde a vazão e o nível da água em uma seção específica são influenciados por condições que se manifestam a jusante dessa seção. Um exemplo são os trechos de rio próximos ao mar, que sofrem a influência das marés, impactando suas dinâmicas hidrológicas.

Naghattini (1999) destaca que é importante observar que a presença de um afluente significativo no trecho fluvial em questão pode complicar e invalidar a análise mencionada. O efeito de atenuação pode ser exemplificado pela ação de um reservatório formado por uma barragem, cujos órgãos de descarga são projetados para uma determinada defluência máxima. As defluências estão diretamente relacionadas ao armazenamento, refletindo-se nos níveis do reservatório criado pela barragem.

2.9.1 Modelo Muskingum-Cunge

O método de Muskingum-Cunge visa a atenuação da propagação das cheias nos rios e resulta de uma modificação do método original de Muskingum, realizada em 1969. Este método utiliza propriedades físicas, como comprimento, declividade, largura e rugosidade, para a obtenção de dados relevantes na análise hidrológica (ROCHA, 2022).

Este método visa simular a propagação de vazões nos cursos d'água e possibilita o cálculo do hidrograma amortecido na seção de saída a jusante de um canal, a partir do hidrograma de entrada a montante (COLLISCHON e DORNELLES, 2013).

O cálculo é realizado com base em uma das equações de Saint-Venant, especificamente a equação da continuidade. O modelo Muskingum-Cunge considera a relação entre o armazenamento na calha de formato prismático e as vazões de entrada e saída, além da inclinação do rio. Entre os parâmetros utilizados na simulação, destaca-se o coeficiente de Manning, que está relacionado ao fator de rugosidade. Este coeficiente é determinado em função das características das margens e do leito do rio, bem como das condições do solo e da cobertura vegetal, permitindo a atribuição de um valor fixo representativo para a bacia (COLLISCHON, 2001).

2.10 Modelos Digital de Elevação

De acordo com Guth *et al.* (2021), Modelos Digitais de Elevação (MDE), ou em inglês *Digital Elevation Models* (DEM) é um termo geral para uma superfície topográfica em formato digital de alturas, baseado em pontos ou em áreas com formatos de armazenamento de arquivos de imagens raster.

Os Modelos Digitais de Elevação podem ser classificados em Modelo Digital de Superfície (MDS) ou *Digital Surface Model* (DSM) e o Modelo Digital do Terreno (MDT) ou *Digital Terrain Model* (DTM), o MDS é um MDE que limita acima da litosfera, hidrosfera, criosfera, biosfera ou antroposfera, enquanto que o MDT é um MDE que limita apenas a litosfera, removendo elementos do MDS através de interpolação, a Superfície Não Vegetada (SNV) ou *Non-Vegetated Surface* (NVS) é um MDS que exclui a biosfera mantendo a antroposfera, conforme Figura 25.

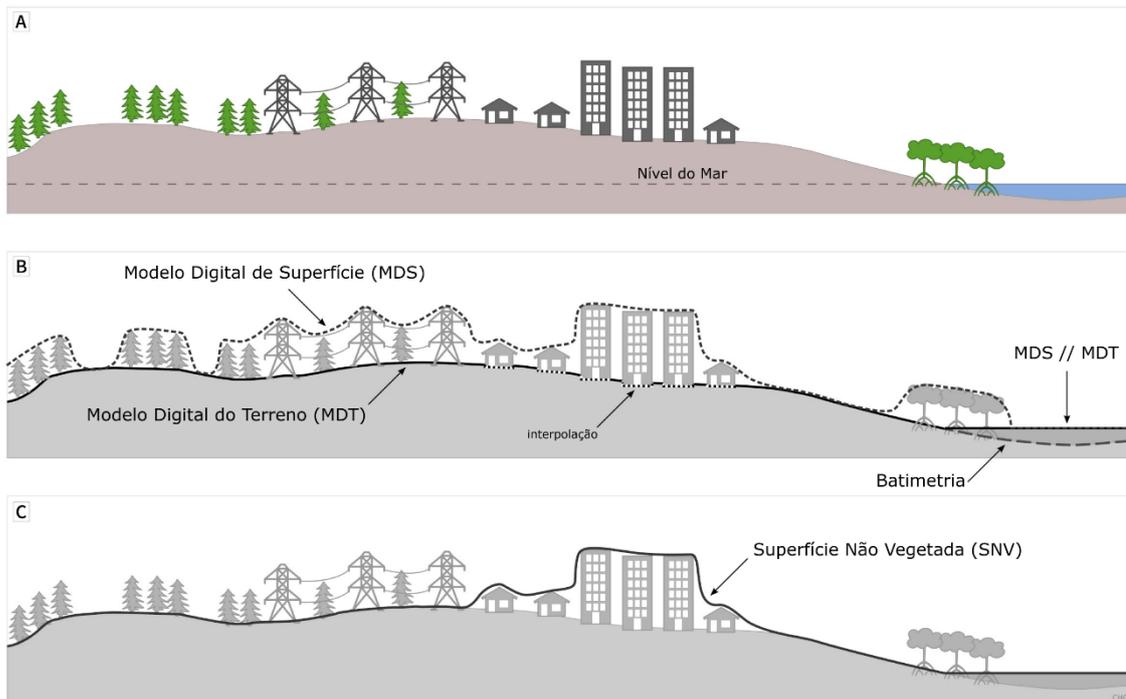


Figura 25: (A) Terreno representado por um (B) modelo digital de superfície (MDS) e modelo digital de terreno (MDT) e (C) uma superfície não vegetada (SNV)

Fonte: Adaptado Guth *et al.* (2021)

2.11 Modelos Hidrológicos para a gestão da cheias

Modelos hidrológicos são ferramentas essenciais na gestão de cheias, simulando o comportamento da água em bacias hidrográficas. Eles podem ser físicos, empíricos ou híbridos, e consideram fatores como precipitação, evapotranspiração e escoamento. Esses modelos ajudam na previsão de eventos de inundação, análise de risco e planejamento de infraestrutura, como barragens e sistemas de drenagem. Para garantir precisão, os modelos precisam ser calibrados com dados reais e podem ser integrados a tecnologias como Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e modelos digitais de elevação (MDE) (DEVANTE e FELDMAN, 1993; SONG, 2015)

Diante da necessidade do desenvolvimento e implementação de técnicas que minimizem os problemas gerados pelas inundações, as ferramentas e gestão do planejamento apresentam-se como uma ferramenta de avaliação e respostas hidrológicas e hidráulicas das bacias hidrográficas no intuito de embasar tomadores de decisão quanto à implementação de medidas coerentes frente aos impactos de eventos extremos. Entre tais ferramentas destaca-se a modelagem.

Tucci (2005) define um modelo como a representação de um sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas. O referido autor destaca que quanto mais complexo o sistema, mais

desafiador e necessário é o modelo e que para uma bacia hidrográfica, deve-se utilizar os recursos possíveis, protegendo suas diferentes características.

De acordo com Tucci (2005), os modelos são usualmente classificados em físicos, analógicos e matemáticos. Os modelos físicos, em geral, representam o sistema por um protótipo. Na hidráulica, os modelos reduzidos são um exemplo de modelos físicos. Os modelos modelam o sistema a partir da analogia de equações que regem diferentes fenômenos. Por sua vez, os modelos matemáticos, também chamados de modelos digitais, representam a natureza do sistema por meio de equações.

A modelagem hidrológica tem promovido significativos avanços no estudo das bacias hidrográficas. Essa abordagem permite representar os impactos das mudanças climáticas e das ações antrópicas sobre o meio ambiente, além de facilitar um alinhamento adequado de informações para o Plano Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (ROCHA, 2022).

No Brasil, diversos modelos hidrológicos foram desenvolvidos, diferenciando-se quanto ao tempo de previsão, podendo ser classificados como de curto, médio ou longo prazo. Essa variedade de modelos possibilita a aplicação da modelagem no dimensionamento e previsão de cenários para o planejamento hídrico (ROCHA, 2022).

Assim, a utilização da modelagem hidrológica se mostra fundamental para a gestão eficiente dos recursos hídricos, contribuindo para a tomada de decisões informadas e a elaboração de estratégias de manejo sustentável.

Os modelos matemáticos são mais versáteis e usualmente utilizados na Engenharia. São modelos em que se pode modificar a sua lógica, obtendo-se resultados de diferentes situações de um mesmo sistema (TUCCI, 2005; SOUZA, 2017).

Os modelos hidrológicos buscam representar o ciclo hidrológico, utilizando a precipitação que cai sobre a bacia hidrográfica e sua relação com a vazão em determinada seção do curso d'água. Dessa forma, os modelos hidrológicos descrevem o processo de chuva-vazão, considerando relevo, interceptação, infiltração e outros fatores, que são fundamentais para o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos (SOUZA, 2017).

Segundo Andrade (2017) a utilização de modelos hidrológicos já é bastante difundida e suas aplicações apresentam resultados favoráveis. O trabalho destaca, ainda, que tais ferramentas são promissoras tanto na simulação de cenários quanto para a avaliação de impactos, além de instrumentos importantes de apoio na elaboração de projetos hidrológicos e hidráulicos.

2.12 Modelagem por meio do HEC-HMS

No que diz respeito à modelagem hidrológica, Andrade (2017) destaca que o software HEC-HMS é bastante difundido, com capacidade de simular processos sob diferentes cenários a partir de informações hidrogeomorfológicas e climáticas. Os sistemas permitem simular desde a precipitação na bacia hidrográfica até a estimativa de vazões.

Os sistemas HEC foram desenvolvidos pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América e são bastante utilizados em estudos sobre sistemas de reservatórios, análise de planejamento, gerenciamento de controle de água etc. (ANDRADE, 2017; URBANI *et al.*, 2023). No presente estudo, dar-se-á ênfase ao HEC-HMS, visto se tratar de um modelo hidrológico.

A plataforma HEC (*Hydrologic Engineering Center*) foi desenvolvida pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (*U. S. Army Corps of Engineers*) e é composto pelos módulos hidráulicos e hidrológicos. O módulo HMS (*Hydrologic Modeling System*), que será utilizado no presente estudo, simula vários procedimentos hidrológicos, incluindo o processo de chuva-vazão (SOUZA *et al.*, 2012).

O HEC-HMS apresenta uma interface gráfica totalmente integrada, que inclui um banco de dados e diversos parâmetros de entrada, permitindo ao usuário realizar movimentações contínuas entre suas diferentes seções. Além de gerar hidrogramas e relatórios de resultados, o software também é capaz de simular vazões, com as informações finais podendo ser utilizadas como base de dados para outros estudos e programas. As informações obtidas incluem picos de vazão, volume de escoamento direto e de base, tempo de descarga, entre outros (USACE, 2019).

Na aplicação do modelo, ele é simplificado em alguns componentes fundamentais, que englobam a combinação do modelo da bacia, o módulo meteorológico e as especificações de controle. Para iniciar o processamento, é necessário delimitar a bacia, indicando as sub-bacias e informando suas características físicas e arranjos. Em seguida, deve-se inserir os dados de precipitação relevantes para a área, utilizando informações meteorológicas. Por fim, é preciso definir o intervalo de tempo, especificando a data e hora de início do evento chuvoso e o instante final da simulação, para que os cálculos possam ser executados (USACE, 2019).

Dessa forma, o modelo HEC-HMS se destaca como um instrumento importante na gestão de inundações, uma vez que, de acordo com Cabral *et al.* (2016), o mapeamento das áreas suscetíveis a inundações se apresenta como uma excelente ferramenta para o planejamento de ações frente os impactos de eventos extremos.

Souza (2017) destaca a capacidade do modelo em simular hidrograma de cheias de uma bacia hidrográfica e elenca outras aplicações dos modelos HEC-HMS: disponibilidade hídrica,

previsão de fluxo, previsão de impacto de urbanizações futuras, análise de reservatórios, controle de danos por inundações, regulação de área de várzea.

De acordo com Andrade (2017) o *software* HEC-HMS possui um ambiente de trabalho integrado incluindo banco de dados, utilitários de entrada de dados, mecanismos de computação, além de relatórios. O HEC-HMS requer pelo menos quatro módulos de entrada: representação da bacia hidrográfica (*basin model*), modelo meteorológico (*precipitation model*), especificação de controle (*control specification*) e módulo de séries temporais (*times series model*).

Cabral *et al.* (2016) utilizaram o HEC-HMS no mapeamento de área de inundação urbana na bacia do rio Granjeiro, no Ceará, e destacaram que o sistema produziu bons resultados, capazes de subsidiar o planejamento urbano e para sistemas de alerta e prevenção frente aos impactos de cheias severas.

Urbani *et al.* (2023) utilizaram o modelo HEC-HMS para a delimitação de manchas de inundação na Bacia hidrográfica do Córrego do Ipiranga, em São Paulo. O modelo permitiu a construção de hidrogramas com diferentes tempos de retorno e ressaltam a importância de medidas de controle dos impactos de inundações.

Dessa forma, o HEC-HMS se apresenta como uma importante ferramenta de gestão dos impactos associados aos eventos de inundação, auxiliando na tomada de decisão e na implementação de medidas de gestão do risco de cheias.

O HEC-HMS é uma ferramenta amplamente utilizada para simular processos hidrológicos, mas apresenta algumas limitações. A dependência de dados detalhados, como precipitação e características do solo, é crucial para a eficácia do modelo, e a falta de dados precisos pode comprometer os resultados. Além disso, a complexidade na configuração e calibração pode ser um desafio para usuários sem experiência, enquanto simplificações nos processos hidrológicos podem não capturar a realidade em bacias complexas (SAHU *et al.*, 2023).

Outro desafio do HEC-HMS é a necessidade de calibração, que pode ser dificultada pela falta de dados históricos adequados para validação. O modelo também pode ser sensível a alterações em parâmetros, afetando a confiabilidade das previsões. Além disso, a resolução espacial dos dados pode limitar a representação precisa de áreas pequenas ou complexas, tornando o HEC-HMS menos eficaz em cenários de mudanças climáticas e em modelagens de escoamento subsuperficial (OUÉDRAOGO *et al.*, 2018).

3. OBJETIVOS

3.1 Geral

Estimar as vazões máximas da bacia hidrográfica do Rio Acre, utilizando modelagem hidrológica por meio do software *Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS).

3.2 Específicos

- a) Analisar as características fisiográfica das sub-bacias do Rio Acre para compreender o seu comportamento hidrológico;
- b) Estimar as vazões máximas para as cidades ribeirinhas do Rio Acre, considerando os tempos de retorno de 5, 25, 50 e 100 anos, simuladas através do HEC-HMS;
- c) Comparar as vazões máximas simuladas pelo modelo hidrológico HEC-HMS com as vazões calculadas através das distribuições teóricas dos dados das estações fluviométricas.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

A bacia hidrográfica do Rio Acre situa-se na Amazônia Sul-ocidental, compartilhada pelos estados brasileiros do Acre e Amazonas, pelo departamento peruano de Madre de Dios e pelo departamento boliviano de Pando, conforme pode ser verificado no mapa de localização (Figura 26). Até o município de Rio Branco a bacia hidrográfica do rio Acre possui aproximadamente 23.433 km² de área de drenagem, até sua foz no rio Purus possui 35.792 km², sendo cerca de 79% de sua área no Estado do Acre, 8% no Estado do Amazonas, 7% no Peru e aproximadamente 6% na Bolívia (ACRE, 2012; CPRM, 2022).

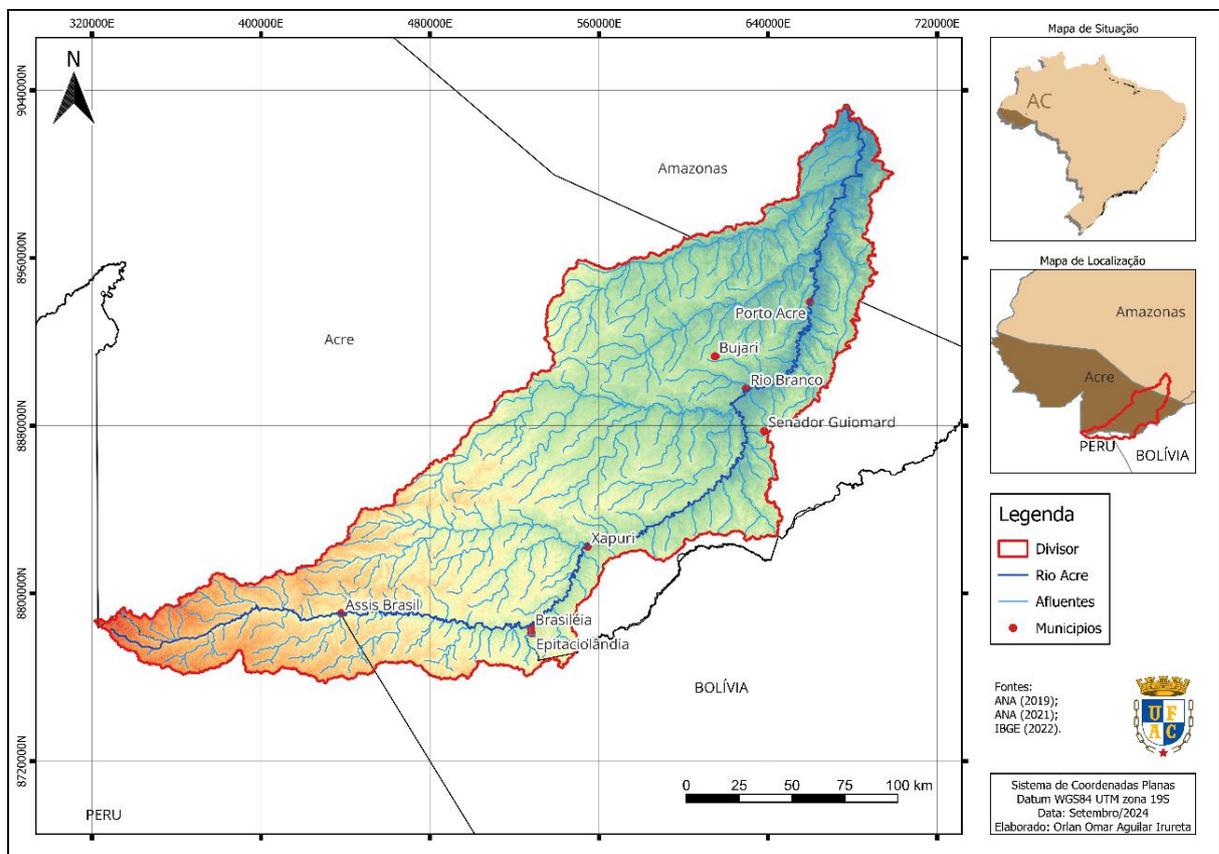


Figura 26: Delimitação da área da Bacia Hidrográfica do Rio Acre.

De acordo com Duarte (2011), a bacia hidrográfica do Rio Acre possui uma área de drenagem de aproximadamente 35.000 km², composta por cinco microbacias principais: Trinacional (abrangendo Brasil, Peru e Bolívia), Xapuri, Rôla, Porto Acre e Biestadual (Acre e Amazonas). Sant'anna (2017), por sua vez, divide a bacia em duas regiões: Alto Acre e Baixo Acre. O Alto Acre compreende desde a nascente, no Peru, até as proximidades das cidades de Brasileira e Cobija, enquanto o Baixo Acre abrange o restante da bacia, passando por municípios

como Xapuri, Capixaba, Senador Guiomar, Rio Branco, Porto Acre (Acre) e Boca do Acre (Amazonas).

Os principais afluentes são o Rio Xapuri e o Riozinho do Rola, este último considerado o mais importante em termos de contribuição de vazão e baixa eficiência de drenagem (ACRE, 2012; ABUD *et al.*, 2015).

Além de possuir uma área de drenagem relativamente pequena quando comparada aos demais grandes rios amazônicos, a bacia do rio Acre também está caracterizada por possuir solos de baixa capacidade de infiltração e grandes áreas de desmatamento ocupadas pela pecuária (BUFFON *et al.*, 2015).

Como consequência entre a combinação entre solos (baixa infiltração), usos dos solos (desmatamento) e regime pluviométrico (chuvas intensas), o Acre possui uma característica de apresentar rápida e significativa elevação de níveis em resposta a chuvas intensas. Como grandes volumes chuva precipitam em pequenos intervalos de tempo em solos com pouca capacidade de infiltração, o volume precipitado rapidamente escoam superficialmente até as redes de drenagem e alcança o rio, provocando a elevação do seu nível (BUFFON *et al.*, 2015).

O Rio Acre tem uma grande importância social e econômica por ser fonte de água para diversos usos na maioria do território do Acre, teve em 2015 sua maior cota histórica, na capital Rio Branco, quando chegou a registrar 18,40m, trazendo diversos impactos para sociedade acreana (TAMWING *et al.*, 2021). A seguir apresenta-se a tabela resumo das cotas históricas e de alerta, conforme informado pela Defesa Civil Estadual, para o município de Rio Branco.

Quadro 2: Principais cotas do Rio Acre em Rio Branco

Descrição	Cota (m)
Cota de Alerta	13,5
Cota de Transbordamento	14,0
Maior Cota Registrada (2015)	18,40
Menor Cota Registrada (2024)	1,23

Apesar de a bacia do Rio Acre abranger municípios urbanizados, como Assis Brasil, Brasileira, Epitaciolândia, Xapuri, Capixaba, Senador Guiomar, Rio Branco, Porto Acre e Boca do Acre, sua caracterização é essencialmente rural, marcada por vastas áreas de floresta que predominam na paisagem. Essa vegetação nativa desempenha um papel crucial na regulação do ciclo hidrológico, na preservação da biodiversidade e na manutenção dos serviços ecossistêmicos.

Desta forma, realizar simulações hidrológicas para obter vazões máximas na bacia do Rio Acre é fundamental para a gestão dos recursos hídricos e a prevenção de desastres naturais,

como enchentes. Essas simulações permitem compreender o comportamento do sistema hidrológico em diferentes cenários climáticos e de uso do solo, possibilitando a identificação de áreas mais vulneráveis e o planejamento de intervenções adequadas. Além disso, as vazões máximas são essenciais para o dimensionamento de infraestruturas, como barragens e canais, e para a formulação de políticas públicas que visem à segurança hídrica e ao desenvolvimento sustentável da região. Assim, as simulações não apenas informam as estratégias de mitigação e adaptação, mas também contribuem para a conservação dos ecossistemas e a proteção das comunidades que dependem da bacia.

4.2 Materiais

4.2.1 Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

O Sistema de Informações Geográficas utilizado foi o QGIS versão 3.34.10-Prizren, software livre e gratuito, que permite a visualização, edição e análise de dados geoespaciais, trabalhando com dados vetoriais e *Rasters* nos formatos *Shapefile*, *Geotiff* e *GeoPackage*, utilizado para criação de mapas e o georreferenciamento da bacia e sub-bacias, assim como os trechos dos rios e demais dados gerados pela modelagem hidrológica.

No processo de geração de mapas utilizando o QGIS, os dados cartográficos foram combinados, reorganizados e agrupados em camadas adequadas para edição, refletindo a estrutura lógica das informações. Essa organização é essencial para facilitar a manipulação e a visualização dos dados. Empregaram-se diversas ferramentas de geoprocessamento com o intuito de criar novos dados, o que possibilitou uma análise mais aprofundada. Após a realização dessa análise, foram elaborados layouts específicos para a exportação dos mapas em formato de imagem (PNG), garantindo a qualidade e a apresentação visual dos resultados obtidos.

4.2.2 Material cartográfico

Na elaboração dos mapas foram utilizados os limites municipais do estado do Acre, unidades da federação e a delimitação do país, em formato *Shapefile*, disponíveis na área de geociências para *download* pelo público (IBGE, 2022a; IBGE, 2022b; IBGE, 2022c). Com reprojeção da camada vetorial do Sistema de Referência de Coordenadas (SRC) para o WGS 84 / UTM *zone* 19S.

Assim como, a divisão dos países da América do Sul, em formato *Shapefile*, disponíveis no Catálogo de Metadados da ANA (ANA, 2010). Com reprojeção da camada vetorial do Sistema de Referência de Coordenadas para o WGS 84 / UTM zona 19S.

Como delimitação prévia da Bacia do Rio Acre adotou-se a Base de Bacias Hidrográficas do Brasil em escala 1:250.000, em arquivo vetorial, em formato *Shapefile* do quinto nível hierárquico, com *Datum* SIRGAS 2000 e reprojetações para o Sistema de Referência de Coordenadas WGS 84 / UTM zona 19S. (IBGE e ANA, 2021).

Os cursos d'água foram adotados da Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas na escala 1:1.000.000, gerada a partir da cartografia digital da hidrografia do país e organizada de modo a gerar informações hidrologicamente consistentes (ANA, 2019).

As localizações georreferenciadas e principais características das estações Fluviométricas e Pluviométricas da Rede Hidrometeorológica Nacional, disponíveis no catálogo da ANA em formato *GeoPackage*, com reprojeção da camada vetorial do *DATUM* SIRGAS 2000 para o WGS 84 / UTM zona 19S (ANA, 2023).

O conjunto de dados *Curve Number* (CN) globais para modelagem e projeto hidrológico em arquivo *raster* no formato Geotiff na resolução espacial de 250 m, para condições de escoamento antecedente médio, seco e úmido com base no conjunto de dados de grupo de solo hidrológico HYSOG250m e no conjunto de dados de cobertura de terra global ESACC-CI 2015 na resolução espacial de 300 m (JAAFAR e AHMAD, 2019).

A reprojeção dos arquivos vetoriais e raster para o sistema WGS 84 / UTM zona 19S é fundamental para garantir a compatibilidade com o Sistema de Modelagem Hidrológica (HMS). Embora o SIRGAS 2000 seja o padrão geodésico adotado no Brasil, a adoção do WGS 84 / UTM zona 19S se faz necessária para otimizar a integração e a análise dos dados cartográficos no contexto da modelagem hidrológica.

4.2.4 Imagem Satélite

Para representar a superfície da Terra, incluindo edificações, infraestrutura e vegetação, utilizou-se o Modelo Digital de Superfície (DSM). Dentre as opções disponíveis, adotou-se o *Copernicus Global DEM*, que possui resolução *raster* de 30 m (GLO-30) e está referenciado ao *Datum* WGS 84. Os dados foram acessados por meio do plugin OpenTopography do Sistema de Informação Geográfica (SIG) (ESA, 2024). Essa escolha garantiu uma representação detalhada e precisa da superfície, essencial para análises geoespaciais abrangentes.

4.2.5 HidroWeb

Para consulta da rede Hidrometeorológica Nacional utilizou-se o Portal HidroWeb, que oferece acesso livre aos dados de níveis fluviais, vazões, chuvas, climatologia, qualidade da água e sedimento das estações fluviométricas e pluviométricas, com registros diários realizados pelos observadores e aferidos por técnicos (ANA, 2024).

4.2.6 Hidro 1.4

Após todos os dados terem sido adquiridos por meio do sistema Hidroweb, utilizou-se o software Hidro 1.2 para a obtenção das vazões máximas mensais, para posterior tratamento estatístico no ano hidrológico do Rio Acre.

4.2.7 Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)

Sistema de Modelagem Hidrológica desenvolvida pelo Centro de Engenharia Hidrológica do corpo de engenheiros do exército dos EUA, na versão 4.11. Software utilizado para realizar a modelagem hidrológica do Rio Acre, afim de obter uma previsão de vazões a partir da simulação em um intervalo de tempo, com base no MDE, dados de séries temporais e dados em formato de grades, além de possuir compatibilidade com o QGIS.

4.3 Método

4.3.1 Aquisição do Modelo Digital de Elevação (MDE)

Para aquisição do MDE da área da Bacia do Rio Acre, primeiramente deve-se realizar um cadastro no site do *OpenTopography* afim de obter uma chave de acesso aos dados, posteriormente no QGIS instala-se o plugin do *OpenTopography* para obter as imagens de satélites das mais diversas fontes, incluindo a chave de acesso baixa-se em arquivo *raster* o MDE *Copernicus* para dentro do GIS.

4.3.2 Recorte do MDE

Uma vez obtida a imagem de satélite em formato Geotiff e diminuir o tempo de processamento do *hardware*, recortou-se o *raster* pela camada de máscara. A camada adotada para recortar é um arquivo com *buffer* de 5km realizado da delimitação da bacia do Rio Acre da Base de Bacias Hidrográficas do Brasil em escala 1:250.000.

Considerando que o HEC-HMS realiza a própria delimitação da bacia, gerando sua própria rede de drenagem, neste trabalho considerou-se informar o MDE *Copernicus* para além dos divisores estabelecidos pela ANA, possibilitando uma nova delimitação da bacia hidrográfica com base no MDE.

4.3.3 Modelo de bacia e dados do terreno

Após o recorte do MDE *Copernicus* com 5km além da delimitação da bacia do Rio Acre estabelecido pela ANA, realiza-se a criação do modelo de bacia no HEC-HMS através da aba componentes nomeando com Rio Acre, conforme Figura 27.

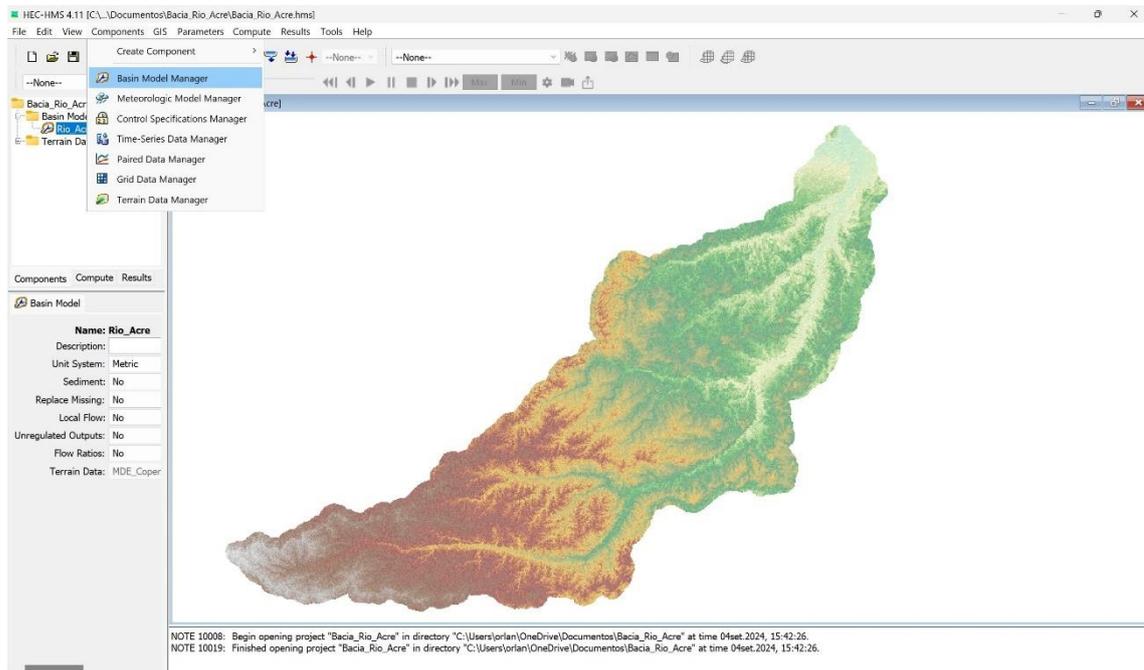


Figura 27: Criando modelo de bacia

Ao criar a bacia define o sistema de coordenadas com *Datum* WGS 84 UTM zona 19 sul, conforme Figura 5, para posteriormente importar o MDE recortado através do gerenciador de dados do terreno disponível na aba componentes, ver Figura 28.

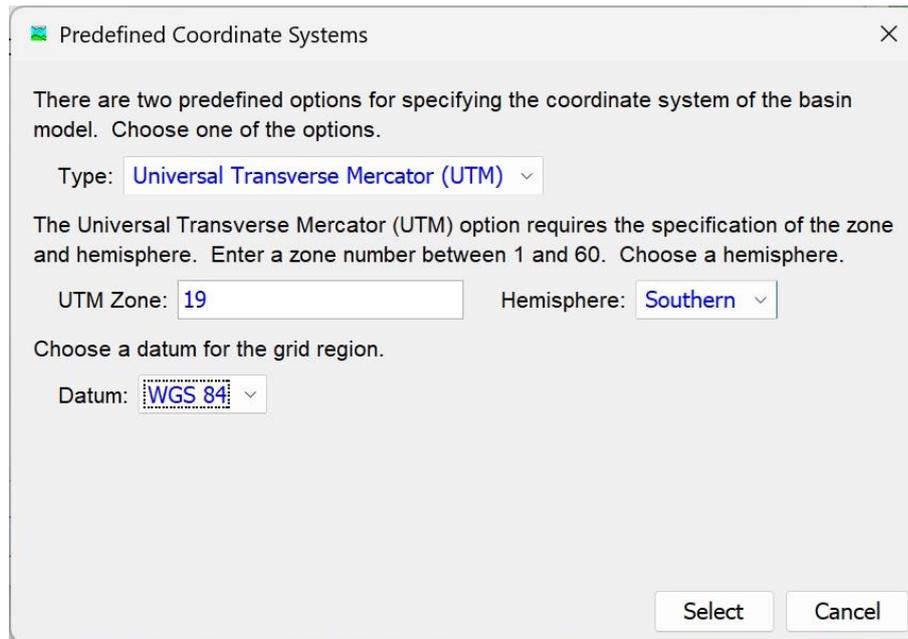


Figura 28: Definindo sistema de coordenadas

Configura-se a bacia criada para associar os dados do terreno com o MDE importado, conforme indicado na Figura 29.

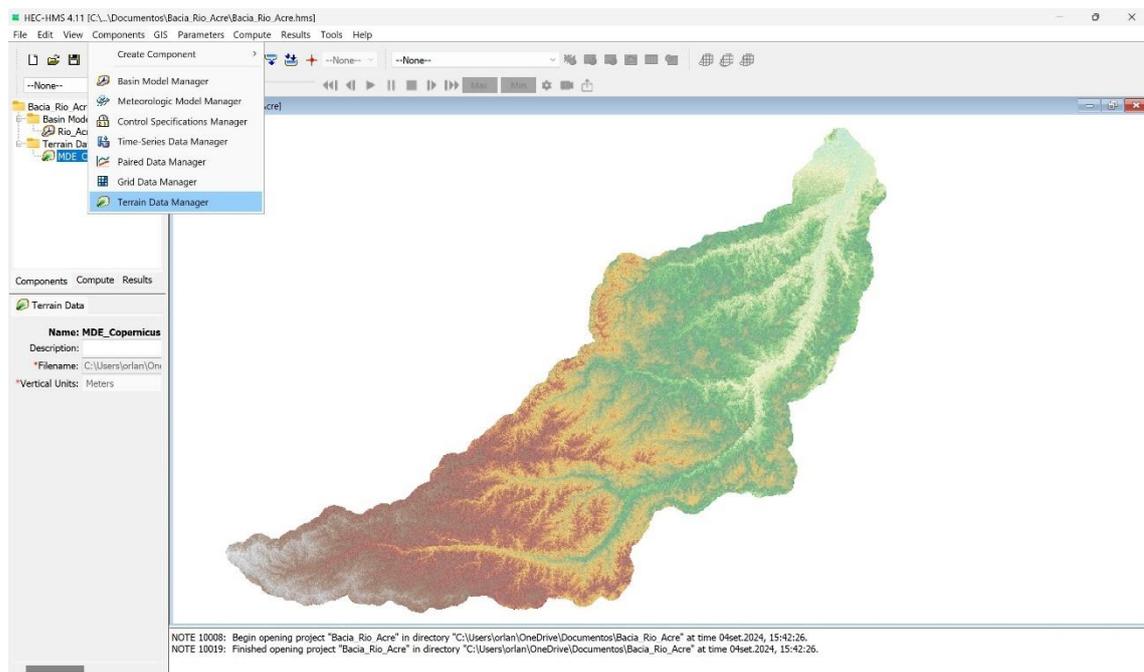


Figura 29: Criando dados de terreno

4.3.4 Pré-processamento

As correções a serem realizadas no MDE serão realizadas através dos comandos *Preprocess Sinks* e *Drainage*, conforme Figura 30 e Figura 31 gerando quatro camadas que *Sink Fill*, *Sink Locations*, *Flow Direction* e *Flow Accumation*.

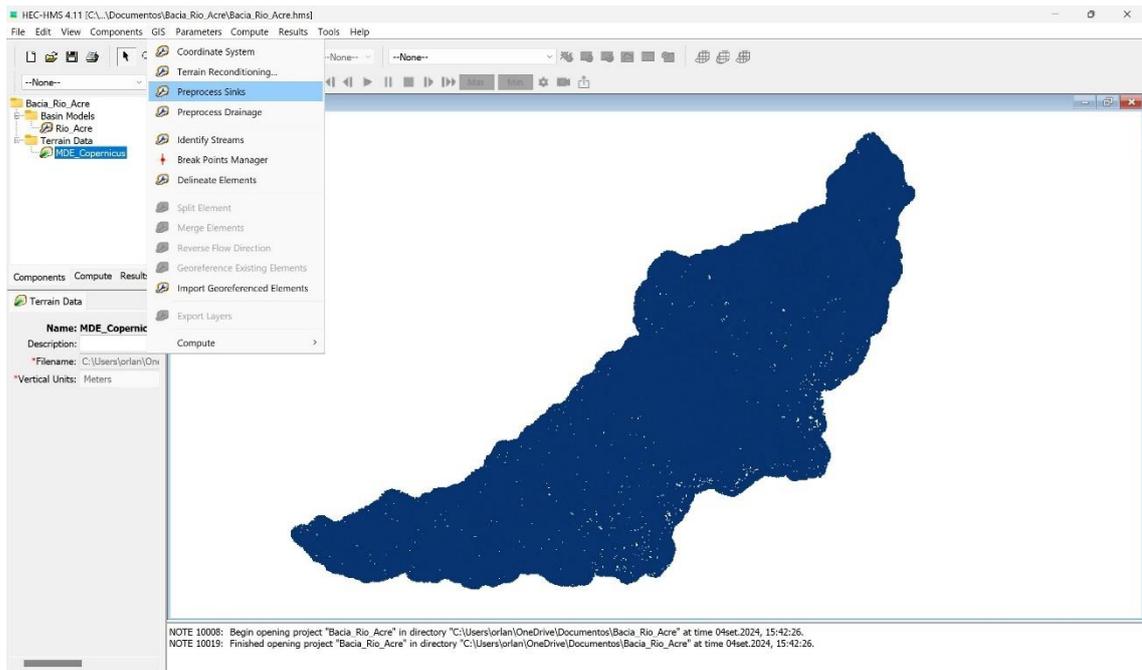


Figura 30: Camada *Sink Locations*

Os comandos localizam e corrigem as depressões e imperfeições digitais do MDE, os vales gerados nos modelos impedem o escoamento superficial, gerando uma descontinuidade na direção dos cursos d'água, processo utilizado para definir uma melhor hidrografia (USACE, 2023).

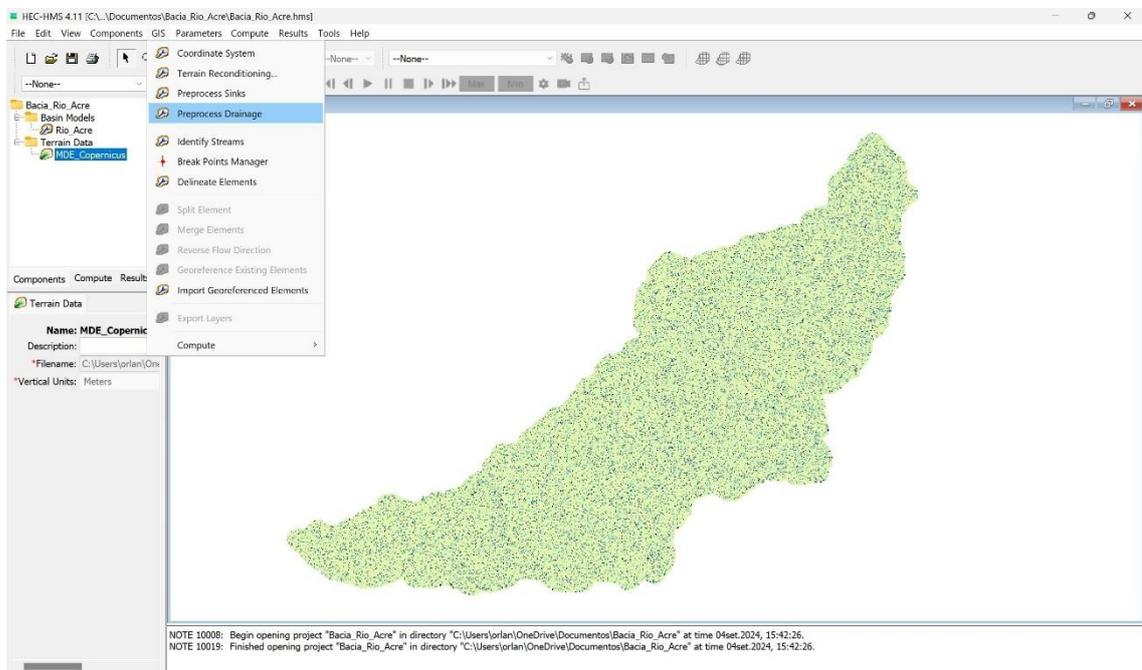


Figura 31: Camada *Flow Accumulation*

Na Figura 32, verifica-se a rede de drenagem, em detalhe, gerada pelo HEC-HMS, as camadas podem ser exportadas pra outro GIS de preferência.

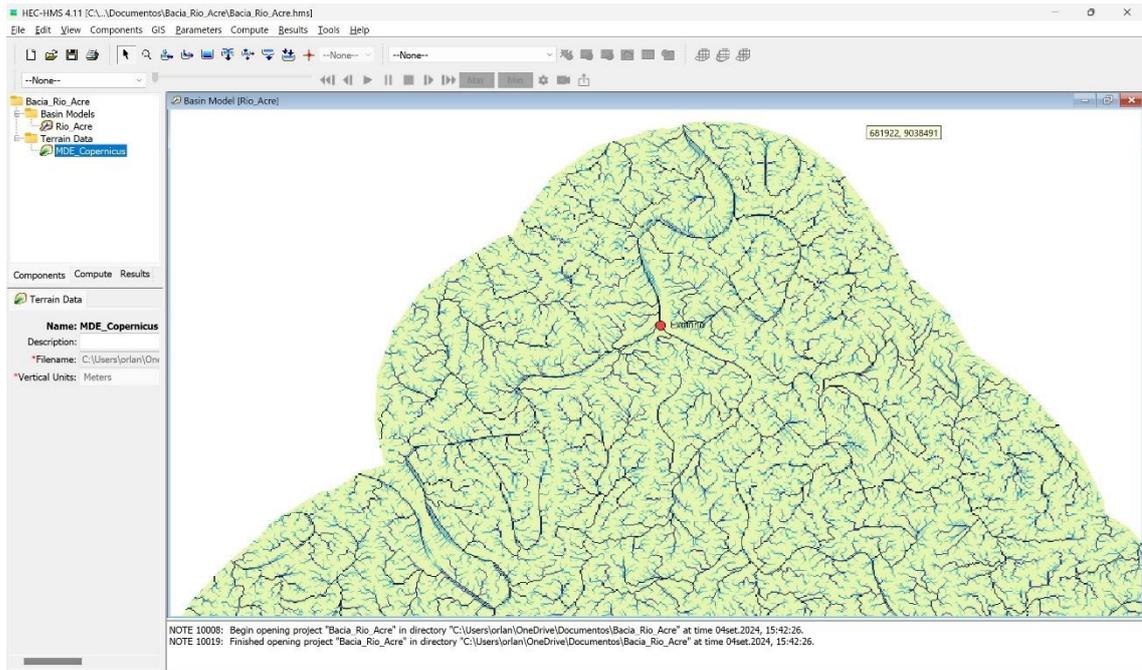


Figura 32: Detalhe da rede de drenagem

4.3.5 Delimitação da bacia e sub bacias

Para delimitar a bacia com base no MDE no HEC-HMS, identifica-se o fluxo de drenagem, mediante o comando *Identify Streams* na aba GIS. Em seguida, define-se uma área de drenagem para cada fluxo, adotando neste trabalho uma área de 3.000km². Essa escolha resulta em um número reduzido de sub-bacias, o que facilita a modelagem e permite que as junções coincidam com as localizações das estações fluviométricas. Isso possibilita a calibração a partir das vazões observadas, na Figura 33 mostra a identificação dos principais afluentes.

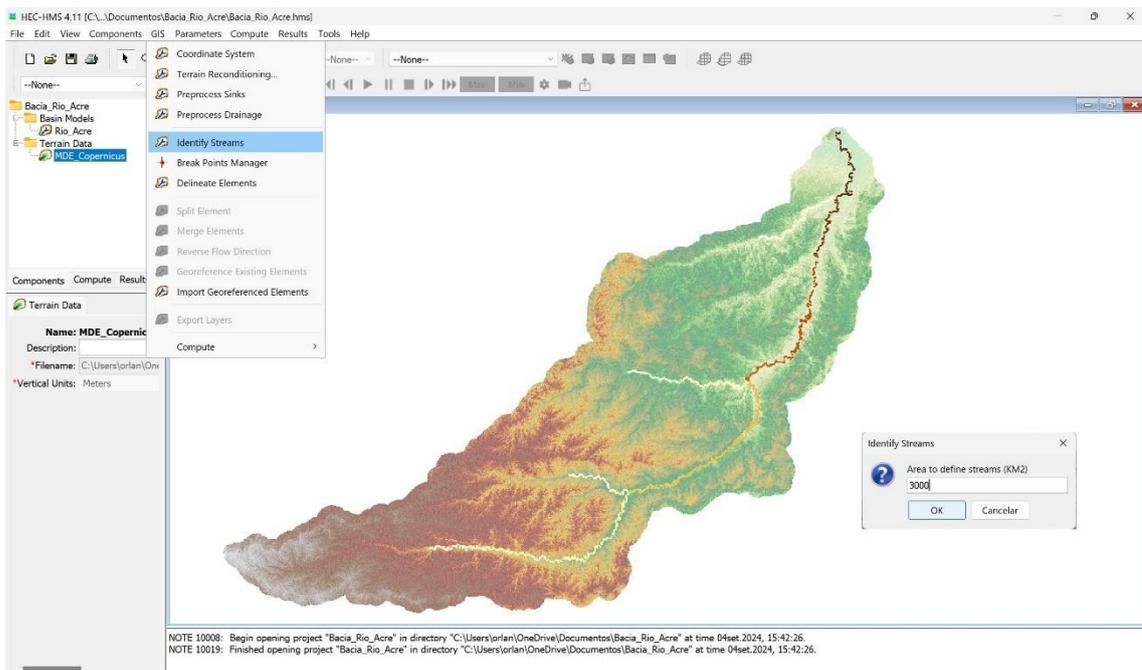


Figura 33: Área de drenagem

Define-se o exultório da bacia através do comando *break point* sobre o talvegue da bacia, ou seja, sobre o fluxo identificado anteriormente, isto fará que a partir do exultório a bacia seja delimitada e subdividida em microbacias menores para uma melhor discretização, a localização do exultório foi estabelecido com foz no Rio Purus no Município de Boca do Acre/AM, conforme Figura 34.

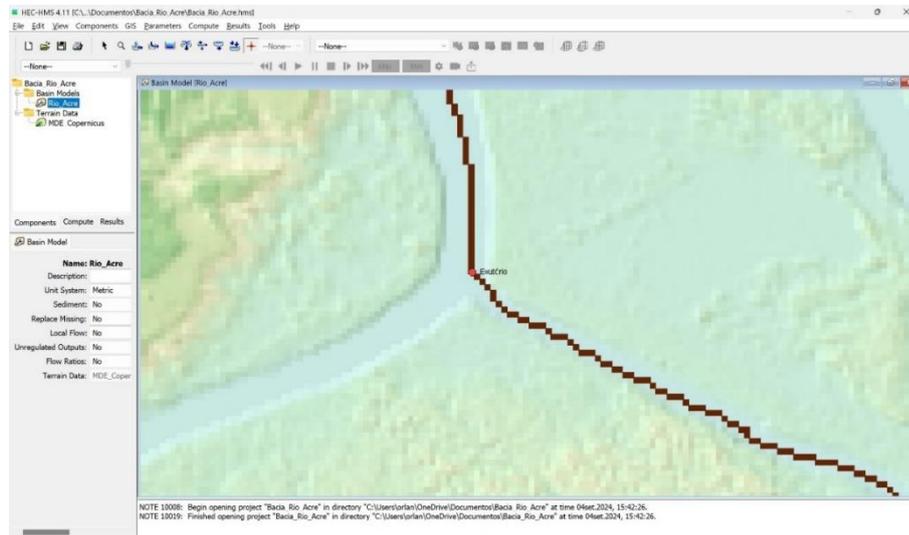


Figura 34: Localização do Exultório

Definido o exultório da bacia, procede-se com o delineamento dos elementos (Figura 35), inserindo o prefixo as sub-bacias (S), rios (R), junções (J) e convertendo o ponto de interrupção em um elemento *Sink* que representa a saída da bacia hidrográfica.

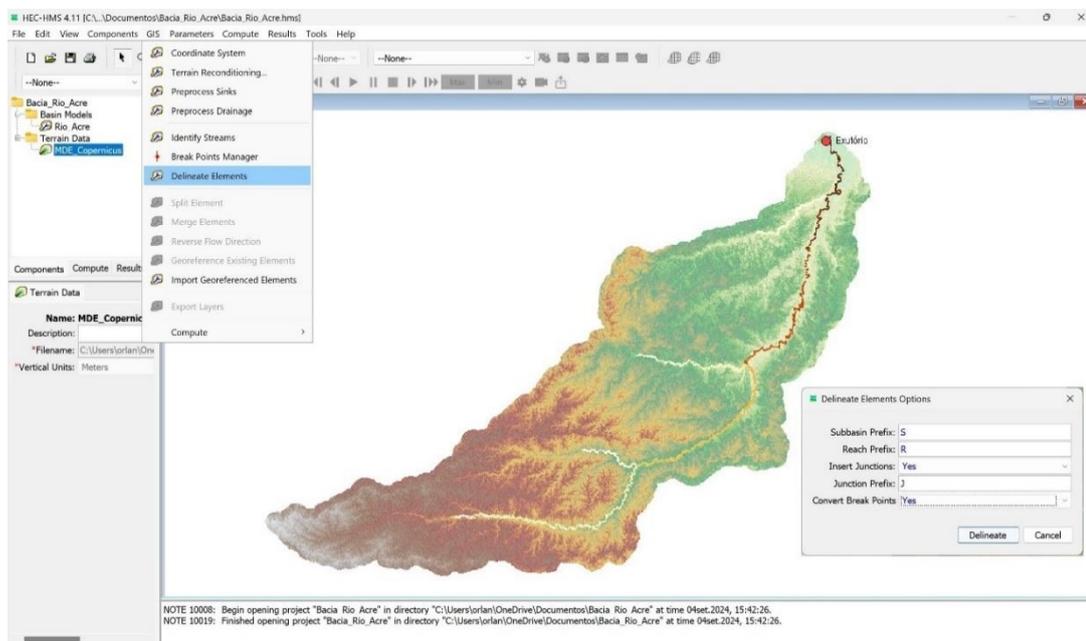


Figura 35 : Delineando elementos da bacia

A divisão inicial da bacia do Rio Acre pelo HEC-HMS, conforme Figura 36, tem critérios conforme a ordem dos afluentes, no entanto realizou-se outras subdivisões para obter mais pontos de verificação.

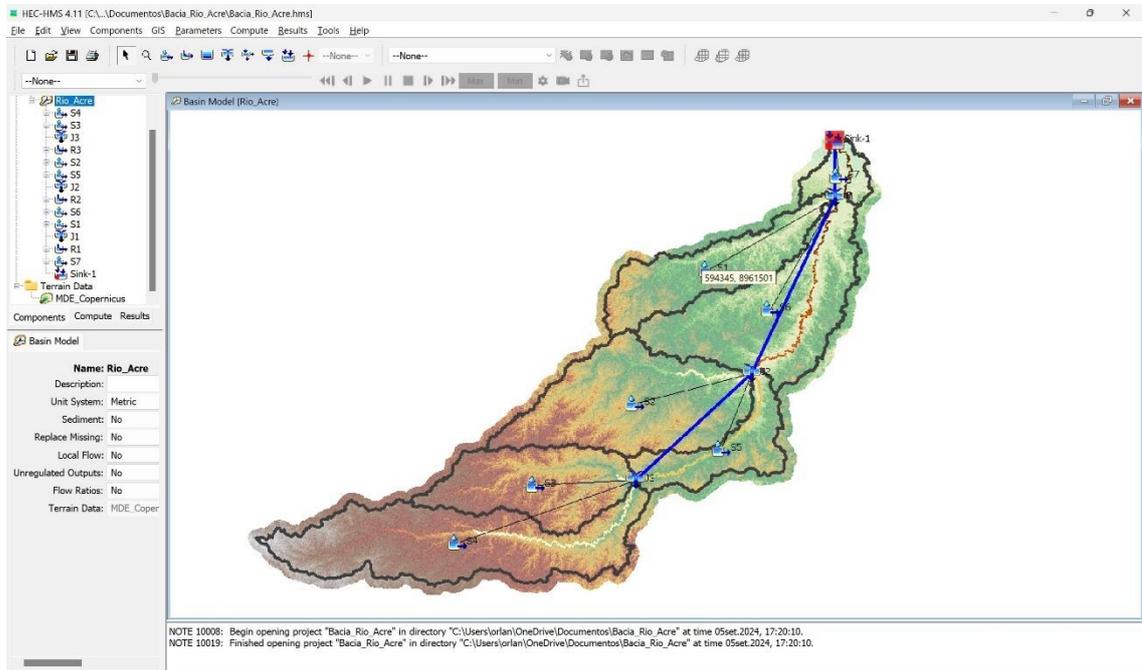


Figura 36: Divisão inicial da bacia do Rio Acre

Os locais da subdivisão das sub-bacias realizadas conforme a localização georreferenciadas das estações fluviométricas da ANA, através do comando *Split Element*, conforme Figura 37, e renomeadas de acordo com o fluxo do escoamento.

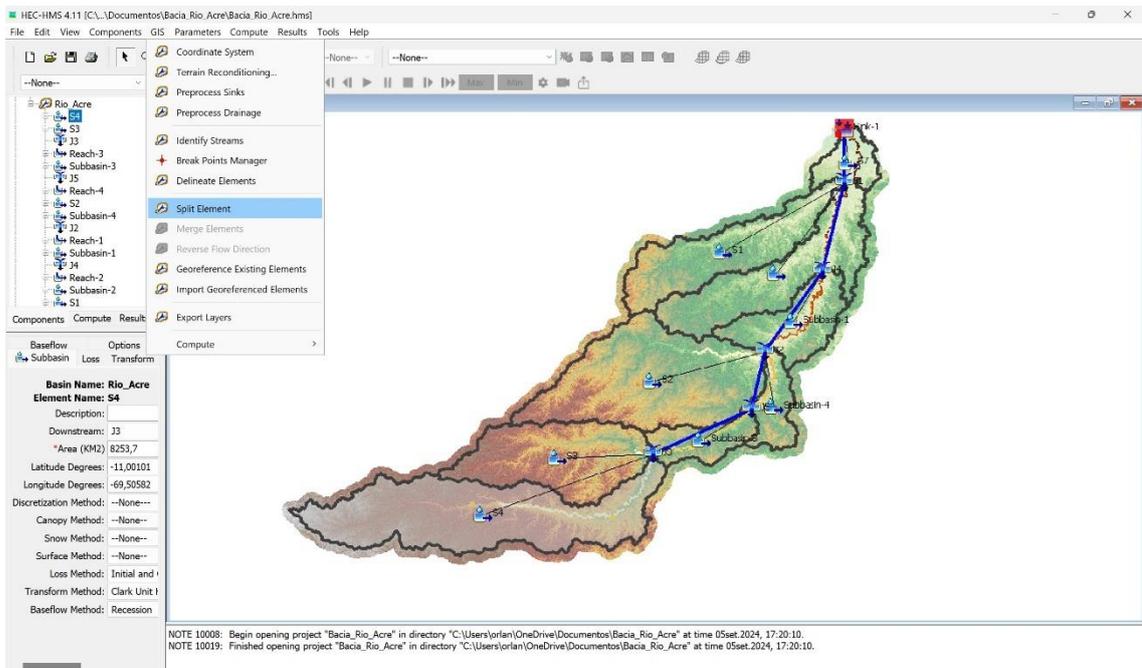


Figura 37: *Split Element* da sub-bacia 01

No presente estudo, a subdivisão da bacia do Rio Acre foi realizada com base nos postos fluviométricos distribuídos ao longo do rio. Inicialmente, a subdivisão proposta pelo software HEC-HMS não coincidia com a localização exata das estações fluviométricas, independentemente da área de drenagem fornecida. Para corrigir essa discrepância, foi necessário importar uma camada georreferenciada contendo as localizações precisas das estações, a fim de ajustar a subdivisão das sub-bacias.

A primeira subdivisão da bacia hidrográfica do Rio Acre resultou em sete sub-bacias, organizadas em três grupos. As sub-bacias S1, S2, S3 e S5 foram agrupadas em uma única unidade, enquanto as sub-bacias S6, S7 e S9 formaram o segundo grupo, e as sub-bacias S10 e S11 constituíram o terceiro, como ilustrado na Figura 38. No entanto, devido à presença de estações fluviométricas em cidades estratégicas como Assis Brasil, Brasiléia, Capixaba e Porto Acre, percebeu-se a necessidade de realizar uma nova subdivisão, desta vez mais próxima dessas estações. Essa mudança tinha o objetivo de permitir uma verificação mais precisa das vazões de água nessas áreas. A identificação e adaptação dessas estações fluviométricas desempenharam um papel crucial no processo, garantindo que a divisão correspondesse às reais condições hidrológicas da bacia.

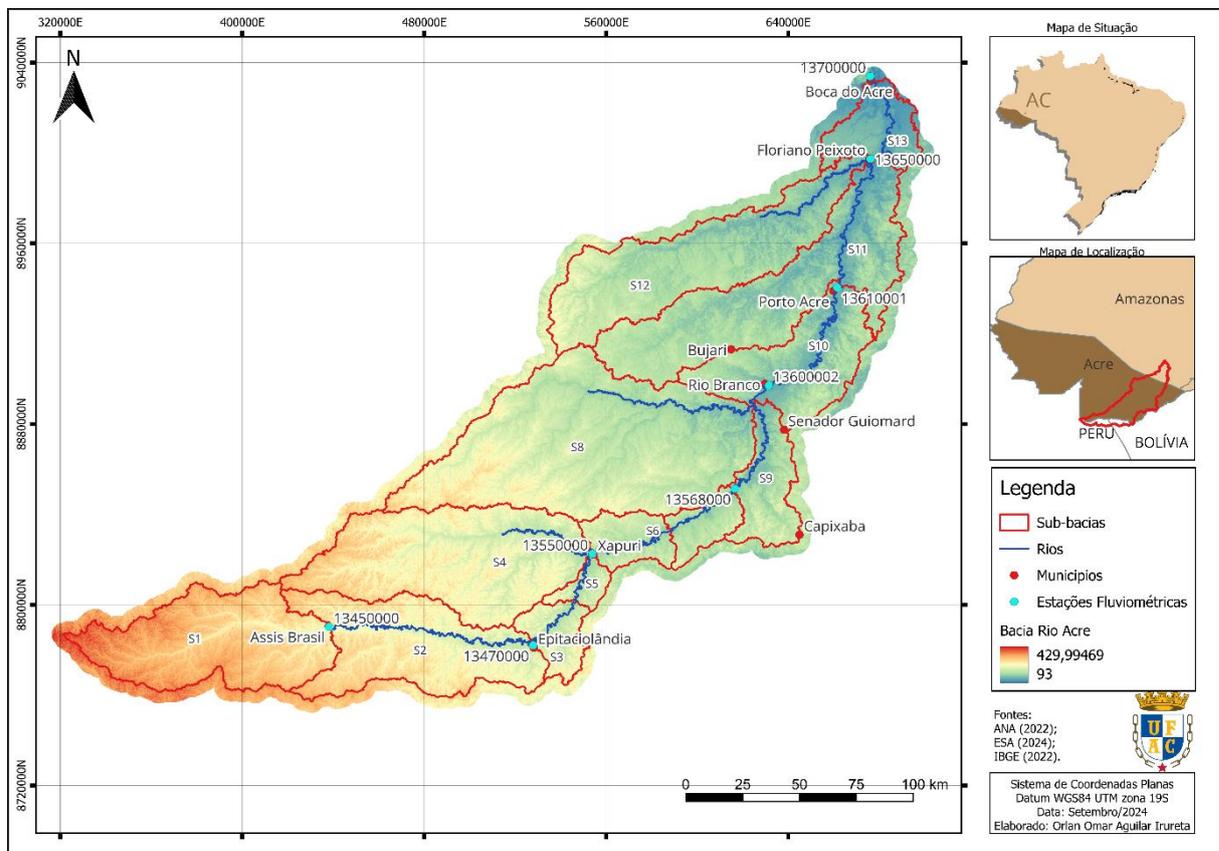


Figura 38: Cidades e estações fluviométricas da Bacia do Rio Acre

4.3.6 Tempo de Concentração

Devido a área das sub-bacias e ao caminho mais longo adotou-se para o cálculo do tempo de concentração a equação do corpo de engenheiro dos EUA, por ser mais adequado a extensas áreas, conforme Silveira (2005).

$$T_c = 2,2 \times \left(\frac{L \times L_c}{\sqrt{Slope_{10-85}}} \right)^{0,3} \quad (11)$$

A equação é baseada no comprimento do caminho mais longo, comprimento do caminho centroide e da declividade do caminho entre 10% a 85%, estes dados são gerados por relatório do HEC-HMS, na aba parâmetros, características das sub-bacias após o delineamento dos elementos.

Compatibilizou-se as unidades pés, milhas e horas, originalmente utilizadas pela equação de tempo de concentração e definindo uma nova equação para as unidades em metros e tempo de concentração em horas:

$$T_c = 0,457128 \times \left(\frac{L \times L_c}{\sqrt{Slope_{10-85}}} \right)^{0,3} \quad (12)$$

4.3.7 Chuva de projeto e distribuição de Huff

Os tempos de retorno para as chuvas de projeto são 5, 25, 50 e 100 anos, com distribuição temporal da chuva pelo método de Huff, utilizando o 4º quartil pois as durações de chuvas adotadas são todas maiores que 24 horas, conforme Tabela 1 e Gráfico 1:

Tabela 1: Quartis de distribuição de Huff

%Tempo	1º Quartil	2º Quartil	3º Quartil	4º Quartil
0	0	0	0	0
0,05	0,16	0,03	0,03	0,02
0,10	0,33	0,08	0,06	0,05
0,15	0,43	0,12	0,09	0,08
0,20	0,52	0,16	0,12	0,10
0,25	0,60	0,22	0,15	0,13
0,30	0,66	0,29	0,19	0,16
0,35	0,71	0,39	0,23	0,19
0,40	0,75	0,51	0,27	0,22
0,45	0,79	0,62	0,32	0,25
0,50	0,82	0,70	0,38	0,28

%Tempo	1° Quartil	2° Quartil	3° Quartil	4° Quartil
0,55	0,84	0,76	0,45	0,32
0,60	0,86	0,81	0,57	0,35
0,65	0,88	0,85	0,70	0,39
0,70	0,90	0,88	0,79	0,45
0,75	0,92	0,91	0,85	0,51
0,80	0,94	0,93	0,89	0,59
0,85	0,96	0,95	0,92	0,72
0,90	0,97	0,97	0,95	0,84
0,95	0,98	0,99	0,97	0,92
1	1	1	1	1

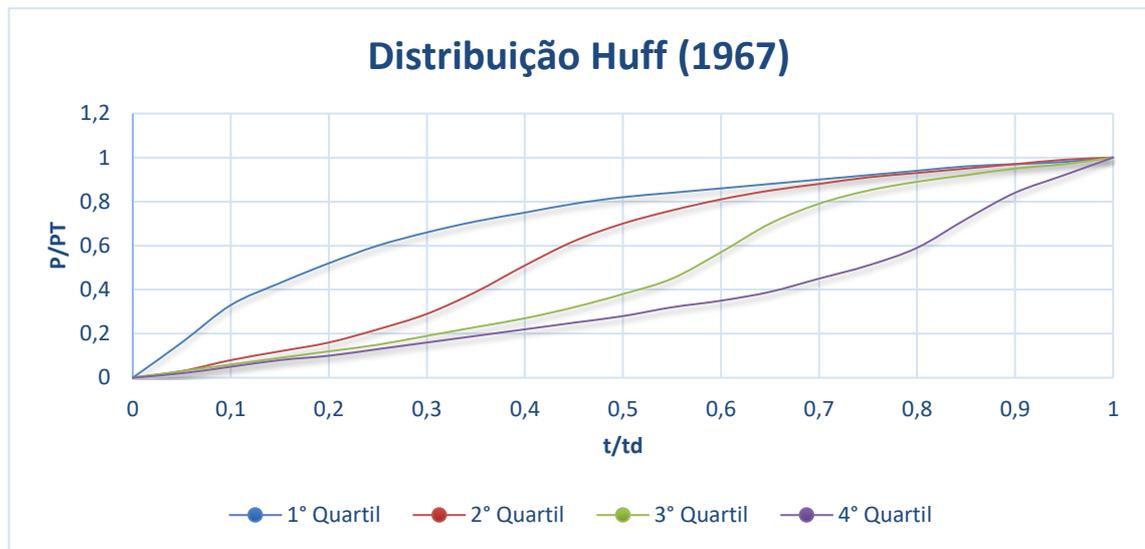


Gráfico 1: Quartis de distribuição de Huff

As durações de chuvas foram determinadas para cada sub-bacia seguindo a metodologia de estimativa de vazões máximas usando o hidrograma unitário do Collischonn e Dornelles (2013), estabelecendo alguns parâmetros como:

- O intervalo de tempo de cálculo (d) devendo ser cerca de 5 a 10 vezes menor do que o tempo de concentração, para permitir descrever adequadamente a subida e a descida do hidrograma, além de resultar em tempos pré-estabelecidos pelo HEC-HMS em 30min, 1hora, 2horas, 3horas, 4horas;
- A duração de chuva (D), definido com aproximadamente 60% maior do que o tempo de concentração da bacia e com a relação de D/d resultando em um número inteiro, obtendo a maior vazão possível.
- Após a distribuição temporal de chuva pelo método de Huff, aplicar o fator de redução de área (adimensional) de acordo com área de cada sub-bacia, conforme equação abaixo, onde A é a área da bacia em km^2 e t é a duração da chuva em minutos:

$$F_{RA} = 1 - \frac{\sqrt{A}}{27,3 \times t^{0,215}} \quad (13)$$

A intensidade da chuva de projeto calculada para cada sub-bacia de acordo com as IDF para o estado do Acre, disponíveis no portal do Serviço Geológico do Brasil, apresentado na Tabela 2, seguindo a equação abaixo onde i é a intensidade da chuva em milímetros/hora, T é o tempo de retorno em anos e t é o tempo de duração da precipitação em horas:

$$i = \frac{[(a \times \ln T + b) \times \ln(t + (\delta/60))] + c \times \ln T + d}{t} \quad (14)$$

Tabela 2: Parâmetros das IDF

Local	a	b	c	d	δ	Fonte
Rio Branco	4,6031	14,8331	10,6897	34,3442	3	jaftunato, <i>et al.</i> (2015)
Xapuri	4,0491	16,5369	9,5108	38,7989	1,8	Faria, <i>et al.</i> (2020)
Brasiléia	4,0491	16,5369	9,5108	38,7989	1,8	Faria, <i>et al.</i> (2022)

A pluviosidade total de cada sub-bacia calculada a partir da equação abaixo, onde P é a pluviosidade total em milímetros, i a intensidade da chuva em milímetro/horas e t é a duração da precipitação em horas:

$$P = i \times t \quad (15)$$

Ou:

$$P = [(a \times \ln T + b) \times \ln(t + (\delta/60))] + c \times \ln T + d \quad P = i \times t \quad (16)$$

Estabelecido os hietogramas para cada bacia em seus respectivos tempos de retorno, informa-se os valores de cada bloco de chuva no HEC-HMS, criando um componente de dados de séries temporais, com estação de precipitação para cada sub-bacia, em unidades de milímetros incremental de acordo com o tempo de duração de cada bloco do hietograma.

Estabelece-se um tempo de início e fim de cada estação de precipitação em 30 dias, para descrever melhor o hidrograma no exutório, devido aos tempos de concentração serem relativamente elevados.

4.3.8 Grade de Curve Number (CN)

Devidos as extensões da bacia hidrográfica do Rio Acre serem extensas, adotou-se o estudo realizado por Jaffar, Ahmad e El Beyrouthy (2019), no qual fornece um conjunto de dados *Curve Number* (CN) globais para modelagem e projeto hidrológico em arquivo *raster* no formato Geotiff na resolução espacial de 250m, para condições de escoamento antecedente médio, seco e úmido, conforme Figura 39.

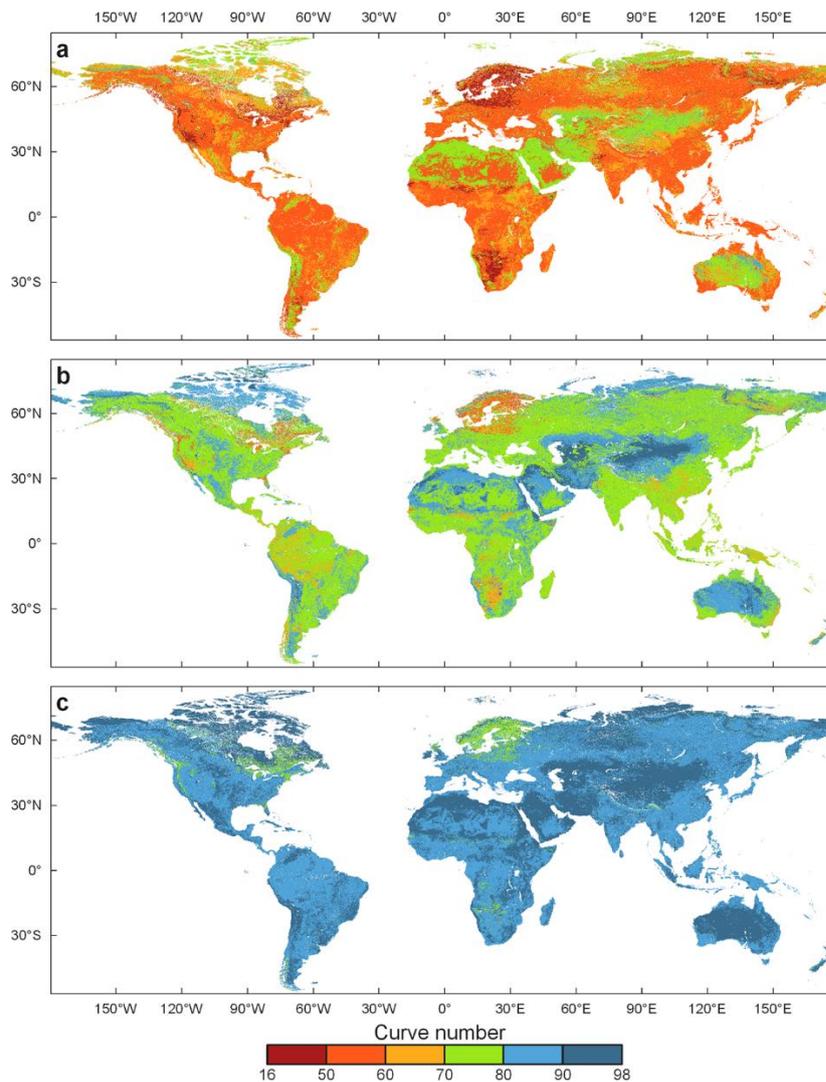


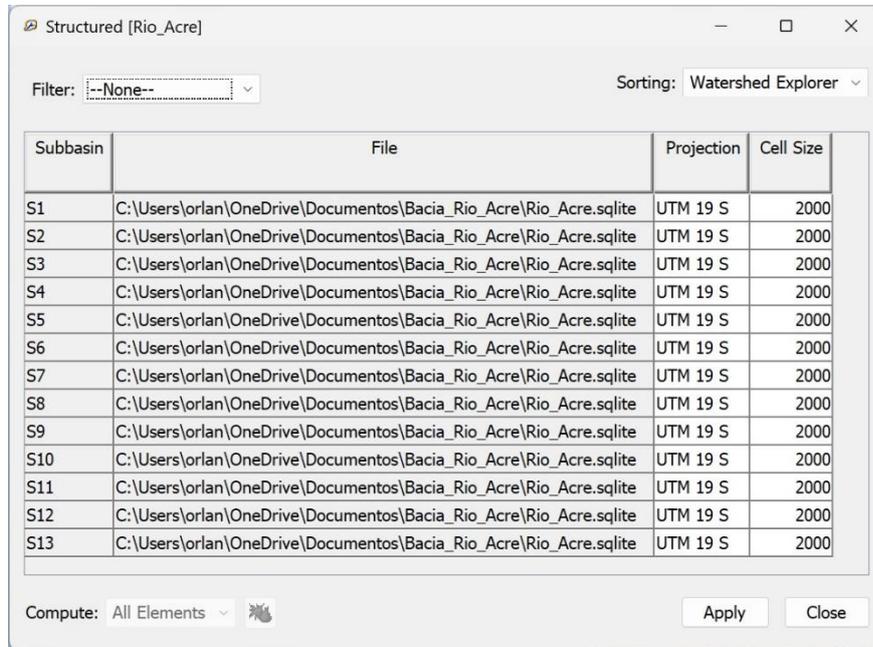
Figura 39: Os três mapas *Curve Number* Global (GCN250). (a) Seco (ARCI), (b) médio (ARCII) e (c) úmido (ARCIII) condições antecedentes de escoamento
Fonte: Jaffar, Ahmad e El Beyrouthy (2019)

Com base nos *rasters* para as três condições antecedentes e diminuir o tempo de processamento do *hardware*, recortou-se o *raster* pela camada de máscara do *Shapefile* da bacia do Rio Acre da ANA com *buffer* de 5km.

Cria-se um componente de gerenciador de dados de grade no HEC-HMS e adiciona três novas grades de SCS *Curve Number* para as três condições seco, médio e úmido informando-

se a localizações dos *rasters* recortados com base na delimitação da bacia hidrográfica do Rio Acre.

Uma vez importado as grades de CN, configura-se a discretização estruturada da bacia no HEC-HMS, através do componente parâmetros, informado o tamanho da célula em 2000 e a projeção UTM 19 sul, conforme Figura 40.



Subbasin	File	Projection	Cell Size
S1	C:\Users\orlan\OneDrive\Documentos\Bacia_Rio_Acre\Rio_Acre.sqlite	UTM 19 S	2000
S2	C:\Users\orlan\OneDrive\Documentos\Bacia_Rio_Acre\Rio_Acre.sqlite	UTM 19 S	2000
S3	C:\Users\orlan\OneDrive\Documentos\Bacia_Rio_Acre\Rio_Acre.sqlite	UTM 19 S	2000
S4	C:\Users\orlan\OneDrive\Documentos\Bacia_Rio_Acre\Rio_Acre.sqlite	UTM 19 S	2000
S5	C:\Users\orlan\OneDrive\Documentos\Bacia_Rio_Acre\Rio_Acre.sqlite	UTM 19 S	2000
S6	C:\Users\orlan\OneDrive\Documentos\Bacia_Rio_Acre\Rio_Acre.sqlite	UTM 19 S	2000
S7	C:\Users\orlan\OneDrive\Documentos\Bacia_Rio_Acre\Rio_Acre.sqlite	UTM 19 S	2000
S8	C:\Users\orlan\OneDrive\Documentos\Bacia_Rio_Acre\Rio_Acre.sqlite	UTM 19 S	2000
S9	C:\Users\orlan\OneDrive\Documentos\Bacia_Rio_Acre\Rio_Acre.sqlite	UTM 19 S	2000
S10	C:\Users\orlan\OneDrive\Documentos\Bacia_Rio_Acre\Rio_Acre.sqlite	UTM 19 S	2000
S11	C:\Users\orlan\OneDrive\Documentos\Bacia_Rio_Acre\Rio_Acre.sqlite	UTM 19 S	2000
S12	C:\Users\orlan\OneDrive\Documentos\Bacia_Rio_Acre\Rio_Acre.sqlite	UTM 19 S	2000
S13	C:\Users\orlan\OneDrive\Documentos\Bacia_Rio_Acre\Rio_Acre.sqlite	UTM 19 S	2000

Figura 40: Tamanho da célula e projeção estruturada

O HEC-HMS gera uma camada de células com tamanho de 2.000m, como mostrado na Figura 41, para que o programa calcule o CN para cada célula e posteriormente para cada sub-bacia.

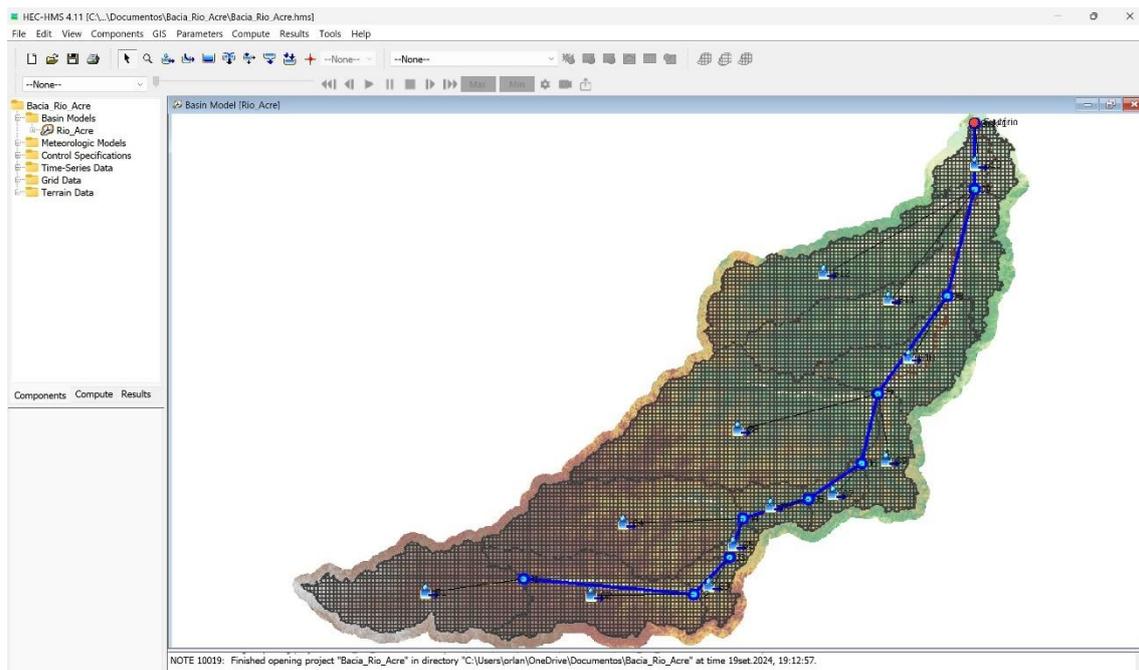


Figura 41: Discretização estruturada da Bacia do Rio Acre

4.3.9 Parâmetros de perda

Com as grades de CN importadas e a estruturação da bacia em células, informa-se ao HEC-HMS os parâmetros de perda da chuva pelo método SCS *Curve Number*, conforme mostrado na Figura 42.

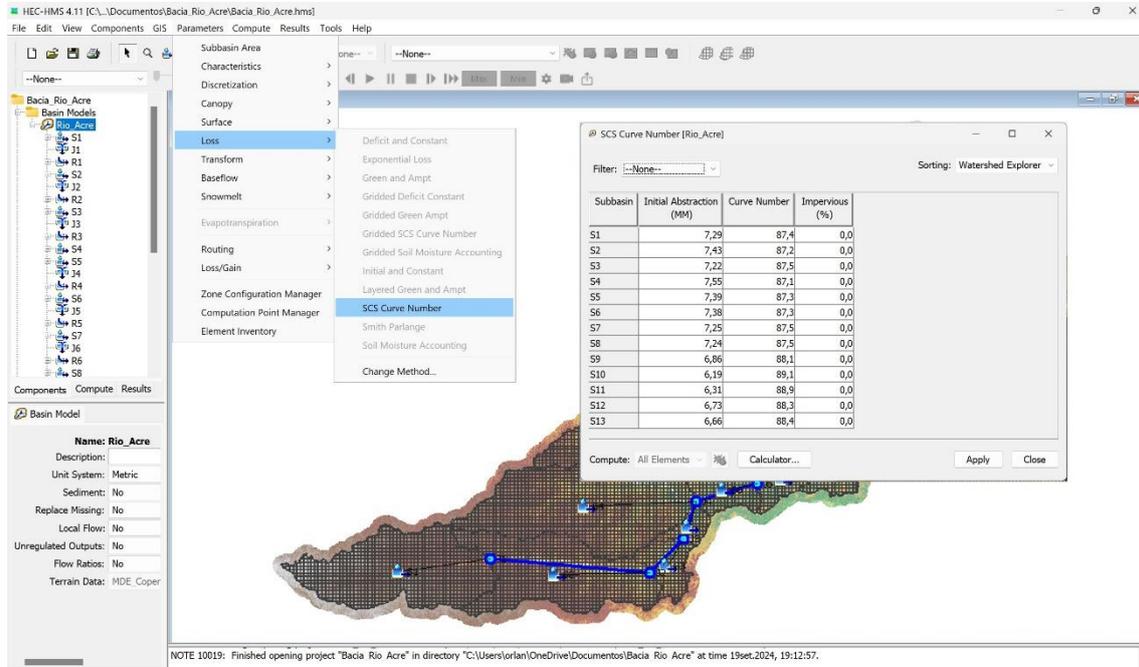


Figura 42: Configurando parâmetros de perda

Os parâmetros de perda são: o CN ponderado e a abstração inicial para cada sub-bacia, que podem ser informados ou calculados pelo sistema através da calculadora. No caso do CN, basta clicar duas vezes na grade importada, conforme Figura 43

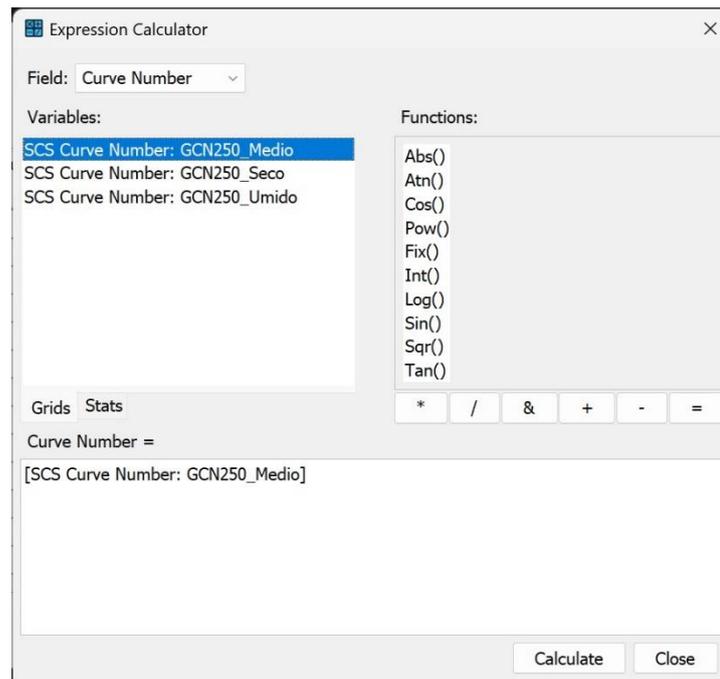


Figura 43: Expressão da calculadora para o *Curve Number*

Após o cálculo do *Curve Number* com base na grade de CN, o cálculo da abstração inicial é uma expressão, conforme mostrado na Figura 44, com uma única variável que é o CN calculado anteriormente.

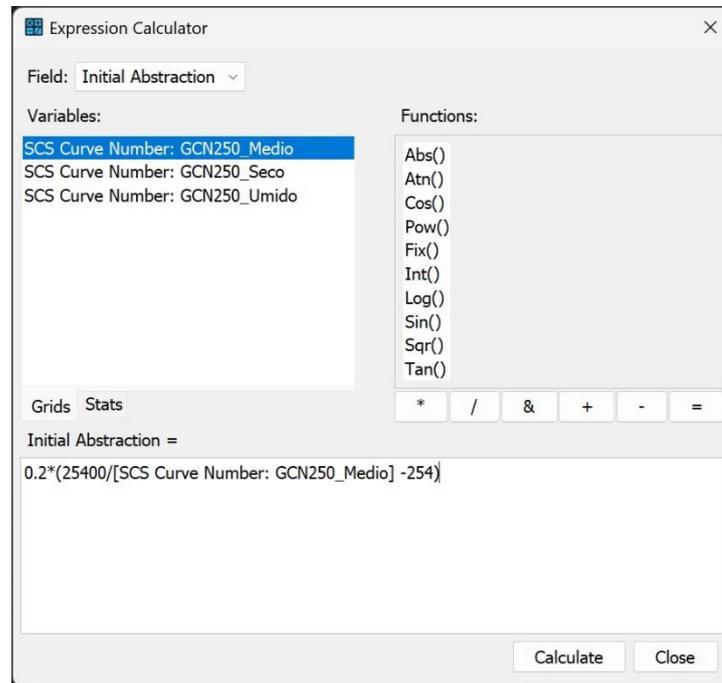


Figura 44: Expressão da calculadora para o *Initial Abstraction*

4.3.10 Transformação chuva vazão e o tempo de pico (Lag time)

Para a transformação de chuva vazão adotou-se o método SCS hidrograma unitário, por ser a metodologia mais adequada para estimativa de vazões máximas e para áreas de bacias superiores 2 km², desprezando-se as perdas por evaporação e evapotranspiração, assim como o escoamento de base, o tempo de pico ou *lag time* do hidrograma é estimado em 60% do tempo de concentração, conforme Collischonn e Dornelles (2013).

Subbasin	Graph Type	Lag Time (MIN)
S1	Standard (PRF 484)	857,74
S2	Standard (PRF 484)	1082,7
S3	Standard (PRF 484)	447,34
S4	Standard (PRF 484)	1105,96
S5	Standard (PRF 484)	400,54
S6	Standard (PRF 484)	795,53
S7	Standard (PRF 484)	519,37
S8	Standard (PRF 484)	1352,09
S9	Standard (PRF 484)	740,3
S10	Standard (PRF 484)	979,7
S11	Standard (PRF 484)	1250,5
S12	Standard (PRF 484)	1401,41
S13	Standard (PRF 484)	562,14

Figura 45: Tempo de pico (*lag time*) informados no HEC-HMS

O tempo de pico calculado com base no tempo de concentração devem ser informados no HEC-HMS na aba parâmetros, transformar e selecionando o método SCS hidrograma unitário, conforme Figura 45.

4.3.11 Parâmetros da propagação de vazões

O método adotado é o Muskingum-Cunge para caracterizar a propagação de vazões nos trechos dos rios entre as microbacias, e para inserir os parâmetros obrigatórios no HEC-MS, configura-se na aba parâmetros, propagação e selecionar o método, conforme a Figura 46.

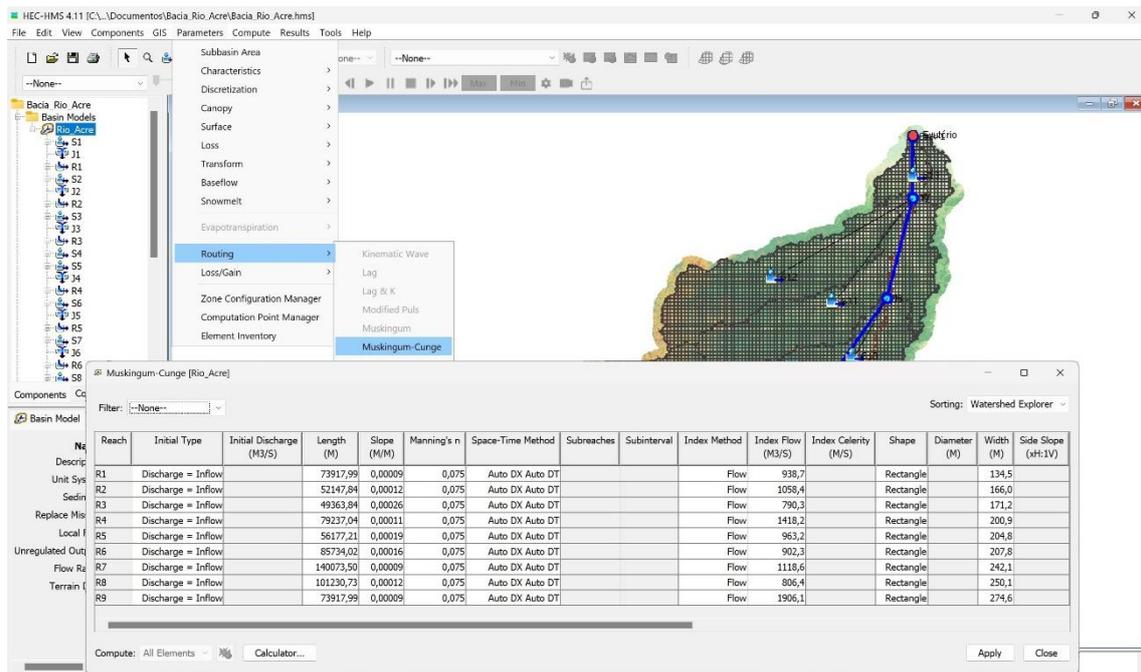


Figura 46: Parâmetros do método Muskingum-Cunge

Na Figura 46 verifica-se que é necessário determinar o comprimento dos trechos dos rios em metros, declividade e o índice de vazão, no entanto o comprimento e a declividade são calculados pelo próprio HEC-HMS gerando relatórios das características fisiográficas dos trechos de rios. A vazão de referência inicialmente configurado como 1m³/s, ajustado posteriormente a 70% do pico de descarga de entrada pós interações de simulações no HEC-HMS (TUCCI, 2005).

Inicialmente adota-se o coeficiente de rugosidade para a fórmula de Manning $n=0,075$ (adimensional), valores típicos de rios com margens espriadas e com presença de vegetação, para todos os trechos dos rios da Bacia do Rio Acre, considerando que estes valores variam de 0,035 até 0,15 (PORTO, 2006).

Define-se uma seção transversal simples de escoamento, retângulo e para o cálculo de largura utilizou-se um estudo que correlaciona a área de drenagem a montante com a largura

do rio a nível global (FRASSON *et al.*, 2019), conforme Figura 47, adotando a seguinte equação, com W em metros e A em quilômetros quadrados.

$$W = 9,68 \times A^{0,32} \quad (17)$$

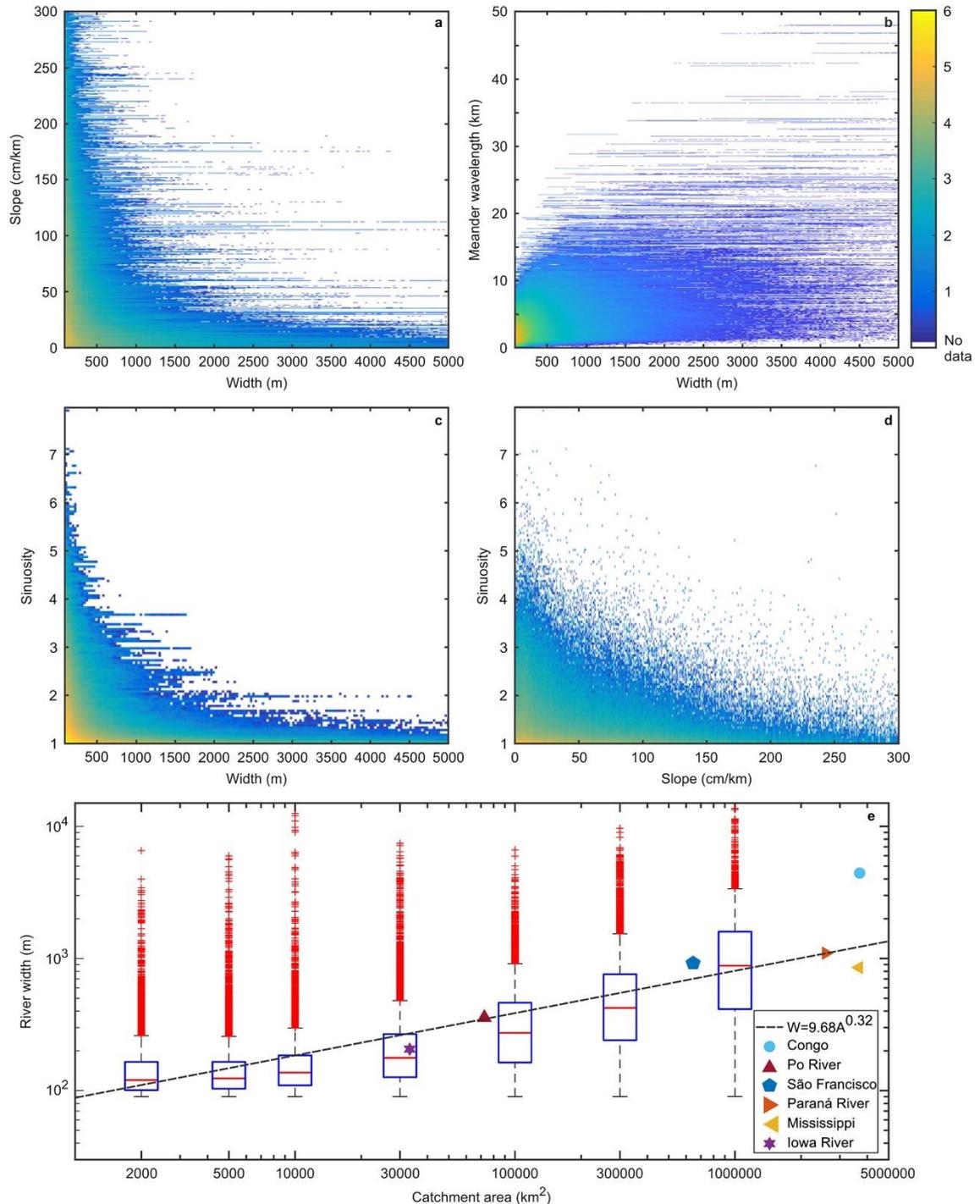


Figura 47: Relações globais entre propriedades fluviais. As cores representam o logaritmo do número de ocorrências por compartimento. Painéis mostram (a) largura versus inclinação da superfície d'água, (b) largura versus comprimento de onda do meandro, (c) sinuosidade versus largura, (d) sinuosidade versus inclinação da superfície da água, (e) gráficos de caixa mostrando a faixa de larguras observadas pelas caixas da área de captação ao longo da lei de potência ajustada ($r^2 = 0,25$ calculado como 1 menos a razão entre a variância dos resíduos e a variação das larguras medidas)

Fonte: Frasson et al. (2019)

4.3.12 Simulação e Resultados

Para a simulação do modelo hidrológico, o HEC-HMS solicita um componente relativo ao modelo meteorológico, ou seja, um componente que interliga o hietograma de chuva criado nos dados de séries temporais para cada sub-bacia, conforme Figura 48. Será criado um modelo meteorológico para cada tempo de retorno neste trabalho.

The left screenshot shows the 'Meteorologic Models' tree with 'Specified Hyetograph' selected. The right screenshot shows the 'Control Specifications' dialog box for 'Control 1'.

Specified Hyetograph

Met Name: Met

Subbasin Name	Gage
S1	Gage 01
S10	Gage 10
S11	Gage 11
S12	Gage 12
S13	Gage 13
S2	Gage 02
S3	Gage 03
S4	Gage 04
S5	Gage 05
S6	Gage 06
S7	Gage 07
S8	Gage 08
S9	Gage 09

Control Specifications

Name: Control 1

Description:

*Start Date (ddMMMYYYY) 01jan.2000

*Start Time (HH:mm) 00:00

*End Date (ddMMMYYYY) 30jan.2000

*End Time (HH:mm) 00:00

Time Interval: 1 Hour

Figura 48: *Meteorologic Models*

Figura 49: *Control Specifications*

Além do modelo meteorológico, o HEC-HMS requer o componente especificação de controle, que significa definir o período que será simulado e analisado, como os hietogramas de chuva está definidos em 30 dias, adotou-se o mesmo período de tempo, intervalado em uma hora, como mostrado na Figura 49, também se criou uma especificação de controle para cada tempo de retorno da bacia.

Finalizado, cria-se uma rodada de simulação, na aba calcular e posteriormente em gerenciador de rodadas de simulação. A rodada de simulação associa o modelo de bacia, o modelo meteorológico e a especificação de controle, conforme Figura 50.

Foi neste momento, verificou-se ao calcular, o HEC-HMS detectou que alguns trechos dos rios não poderiam ser computados na propagação de escoamento, por ter um

comprimento inválido para alcance, desta forma, procedeu-se com a subdivisão das bacias que comportavam esses trechos dos rios, aumentando o número de sub-bacias.

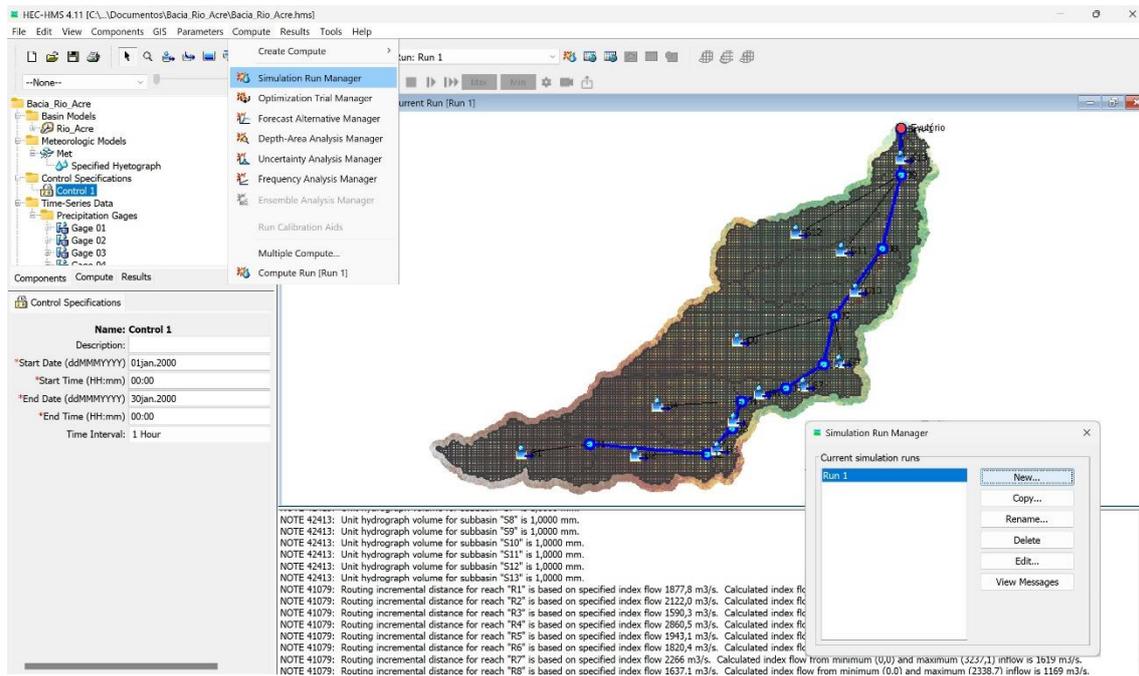


Figura 50: Gerenciados de rodadas de simulações

Após a criação da rodada de simulação aciona-se o cálculo dessa rodada, através da aba cálculo e selecionando a rodada pede-se para calcular, conforme Figura 51. Por fim os resultados são mostrados na aba resultados conforme Figura 52, onde mostra o resumo global da bacia, os gráficos dos hidrograma, uma tabela resumo e uma tabela detalhada, para cada componente (sub-bacia, junção e trecho do rio).

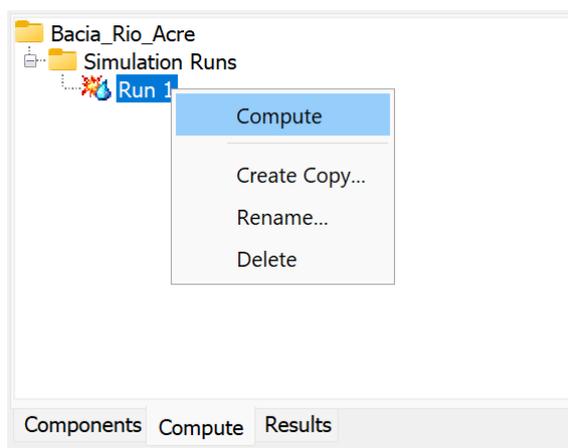


Figura 51: Simulations Runs

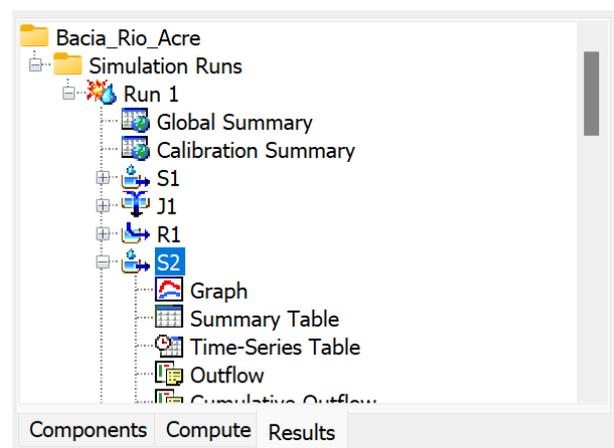


Figura 52: Results

4.3.13 Análise estatística

Para análise de frequência dos eventos hidrológicos extremos de cheias, afim de determinar o tempo de retorno das vazões máximas registradas será através dos métodos empíricos e analíticos com base nas distribuições teóricas.

A análise de frequência empírica das vazões máximas será adotada a fórmula de Weibull dos postos fluviométricos da Rede Hidrometeorológica Nacional (ANA, 2024), acessível através do portal HidroWeb, excluindo as estações que não estão operando e que não possuem registro de medições de vazão e que estão dispostas através do Rio Acre, preferencialmente com responsabilidade e gerenciadas pela ANA, conforme Tabela 3.

Tabela 3: Dados das estações fluviométricas na Bacia do Rio Acre

Município	Estação	Latitude	Longitude	Período analisado
Assis Brasil	13450000	-10,9436	-69,5656	1983 – 2023
Brasiléia	13470000	-11,0178	-68,7450	1982 – 2024
Xapuri	13550000	-10,6511	-68,5075	1967 – 2023
Rio Branco	13600002	-9,9750	-67,8008	1967 – 2024
Floriano Peixoto	13650000	-9,0667	-67,3969	1967 – 2024

Para encontrar as vazões máxima mensais de cada posto fluviométrico utiliza-se o aplicativo da ANA, Hidro 1.4, e definindo como ano hidrológico de setembro a agosto do ano seguinte, para determinar as vazões máxima de cada ano hidrológico das estações.

Foram adotadas para análise de frequência das vazões máximas, as distribuições Log-Normal, Gumbel e Log-Pearson Tipo III.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Características fisiográficas das sub-bacias do Rio Acre

Durante a simulação, observou-se que os trechos entre Eпитaciolândia e Xapuri, e entre Xapuri e Capixaba, tinham comprimento inválido para alcance, impossibilitando a simulação. Para resolver essa limitação, a bacia foi subdividida novamente, resultando em 13 sub-bacias e 9 trechos de rio (Figura 53). Essa nova subdivisão ajustou os parâmetros para trechos menores, permitindo uma modelagem mais precisa e eficiente das dinâmicas fluviais. Isso garantiu que o comportamento hídrico da bacia fosse representado de forma mais adequado.

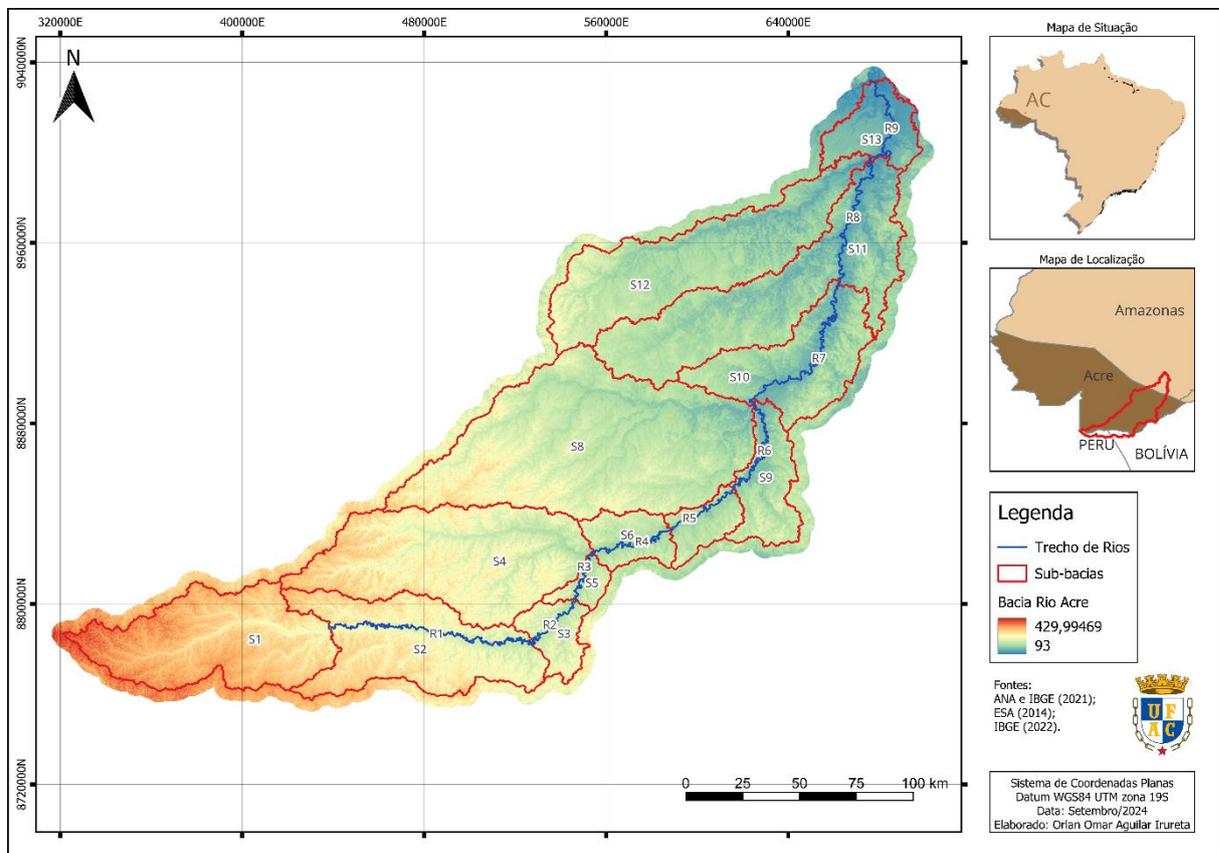


Figura 53: Sub-bacias e trechos dos rios da Bacia do Rio Acre

Com as sub-bacias definidas no HEC-HMS e utilizando o modelo digital de elevação, foi possível determinar o caminho mais longo dentro de cada sub-bacia, desde a saída até o ponto hidráulicamente mais distante a montante. Esse caminho, apresentado na Figura 54, é um dos parâmetros principais para entender o comportamento da bacia, sendo utilizado como base para diversas análises hidrológicas.

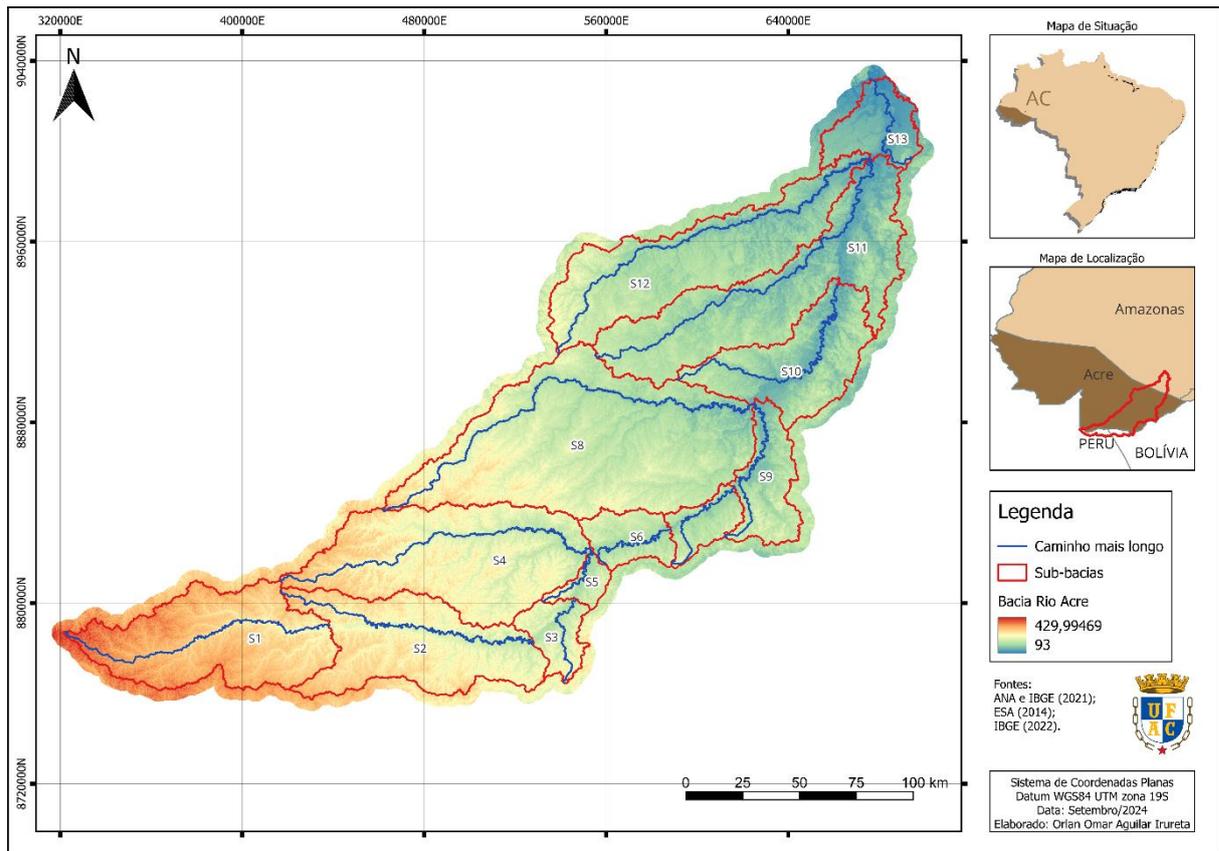


Figura 54: Caminhos mais longo das sub-bacias do Rio Acre

O conceito de caminho mais longo é semelhante ao do comprimento do rio principal de uma bacia, que conforme Christofolletti (1980) é a distância desde a nascente até a desembocadura. Esta é uma das características fisiográficas relevantes, pois influencia nos cálculos relacionados ao tempo de concentração da água (SILVEIRA, 2005), um parâmetro fundamental para o planejamento e gestão de recursos hídricos.

Além do caminho mais longo, utilizando o HEC-HMS também é possível identificar o caminho centroide em cada sub-bacia. Esse caminho se estende da saída até o ponto mais remoto, sendo o trajeto mais próximo ao centro geométrico da sub-bacia. A Figura 55 ilustra esses caminhos centroides para cada subdivisão da bacia. A importância desse parâmetro reside no fato de que ele fornece uma representação mais precisa do comportamento médio do escoamento, oferecendo uma visão equilibrada entre os extremos do terreno. O estudo do caminho centroide é importante para melhorar a precisão dos modelos hidrológicos, garantindo que as dinâmicas da bacia sejam representadas de forma fiel.

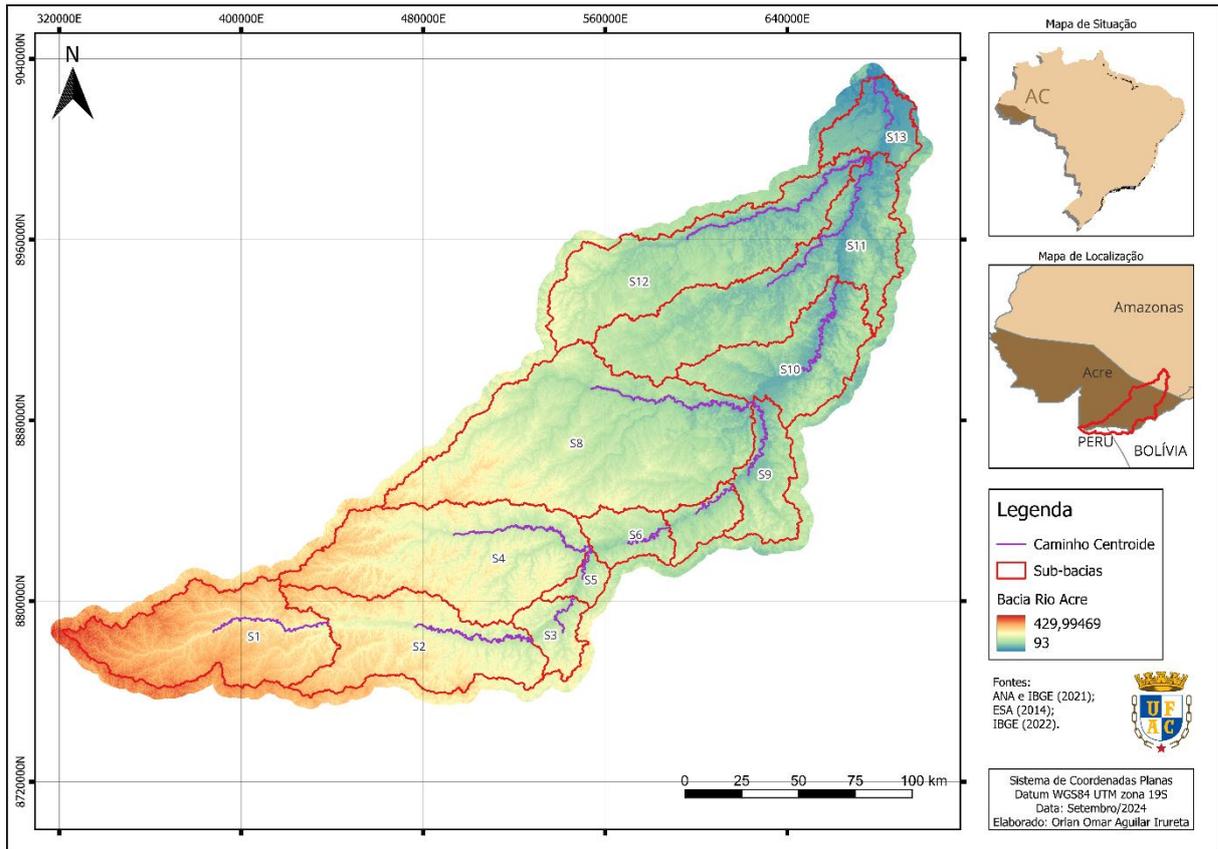


Figura 55: Caminhos centroide das sub-bacias do Rio Acre

Uma característica adicional importante no estudo das sub-bacias é o caminho 10-85, que abrange a porção que vai de 10% até 85% do caminho mais longo. Essa métrica, representada na Figura 56, é utilizada para determinar a declividade ao longo do caminho, uma vez que não é influenciada por elevações acentuadas a montante próximo aos divisores e nem pela baixa declividade na sua saída. O caminho 10-85 proporciona uma visão equilibrada da inclinação do terreno, ou seja, representa uma declividade predominante na bacia, representando uma porção intermediária que reflete mais precisamente as características gerais da bacia.

A declividade do caminho 10-85 é um parâmetro representativo para entender o comportamento hidrológico da sub-bacia, pois afeta na velocidade de escoamento da água e, conseqüentemente, o tempo de concentração. Esse parâmetro torna-se essencial no planejamento de medidas de controle de enchentes, manejo de bacias e outros aspectos da gestão de recursos hídricos.

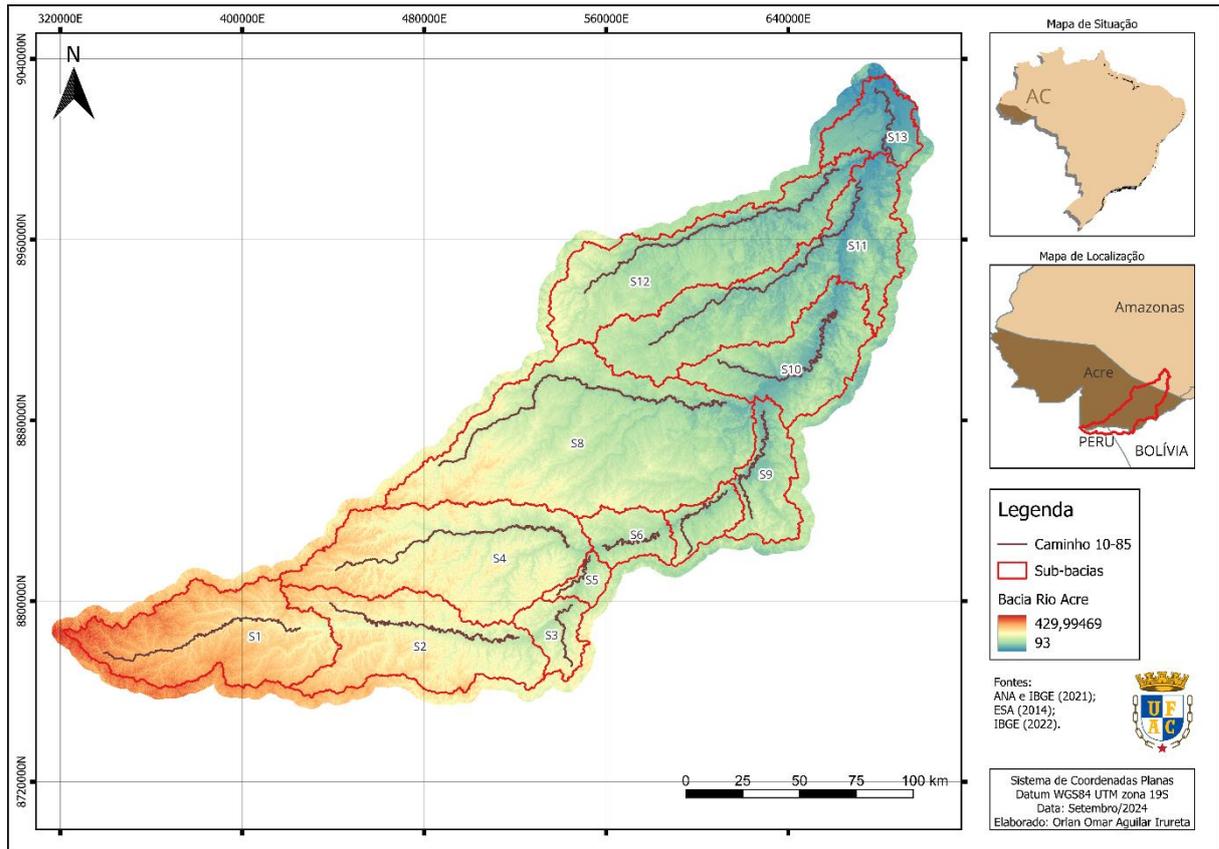


Figura 56: Caminhos 10-85 das sub-bacias do Rio Acre

A Tabela 4 apresenta as características fisiográficas das 13 sub-bacias da bacia hidrográfica do Rio Acre, detalhando uma série de parâmetros importantes para a análise hidrológica. A primeira coluna da tabela identifica as sub-bacias por siglas, enquanto a segunda coluna informa a área de cada sub-bacia em quilômetros quadrados (km²). A terceira coluna apresenta o caminho mais longo dentro de cada sub-bacia, medido em quilômetros, e a quarta coluna fornece a declividade desse caminho (m/m). Na sequência, a quinta e sexta colunas indicam o caminho centroide e sua respectiva declividade, seguidos pelas colunas sete e oito, que mostram o caminho 10-85 e sua declividade. Esses dados são essenciais para a compreensão da topografia e do comportamento das águas ao longo de cada sub-bacia, fornecendo parâmetros cruciais para a modelagem hidrológica.

Conforme destacado na Tabela 4, a maior área entre as sub-bacias corresponde à sub-bacia S8, localizada a montante da cidade de Rio Branco, com uma área de 7.617,70 km². A soma total das áreas das sub-bacias, calculada pelo software HEC-HMS, foi de 35.763,3 km², um valor muito próximo ao encontrado em estudos do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2022), que reportou uma área de 35.795,2 km², e dos dados do IBGE e da Agência Nacional de Águas (ANA, 2021), que indicaram uma área de 35.565,3 km². Essas pequenas variações entre

as fontes demonstram a consistência do modelo HEC-HMS na subdivisão e cálculo das áreas, além de reforçar a precisão dos dados utilizados para a análise hidrológica da bacia do Rio Acre.

Verifica-se que o caminho centroide da bacia é divergente do ponto médio do caminho mais longo. Também foi verificado que o caminho 10-85 representa 75% do caminho mais longo, no entanto, são as cotas de elevação nestas localizações que são os parâmetros mais relevante para o cálculo da declividade do caminho 10-85.

Tabela 4: Características fisiográficas das Sub-bacias do Rio Acre (Parte 01)

Sub-bacia	Área (KM ²)	Caminho Mais Longo Comprimento (KM)	Caminho Mais Longo Declive (M/M)	Caminho Centroide Comprimento (KM)	Caminho Centroide Declive (M/M)	Caminho 10-85 Comprimento (KM)	Caminho 10-85 Declive (M/M)
S1	3.726,10	183,54301	0,00106	81,51051	0,00040	137,65726	0,00080
S2	3.463,70	217,14265	0,00080	111,05894	0,00027	162,85699	0,00044
S3	725,27	64,82587	0,00201	33,58584	0,00084	48,61940	0,00130
S4	4.802,30	237,74043	0,00083	119,50212	0,00037	178,30532	0,00053
S5	338,62	58,15621	0,00218	27,73482	0,00020	43,61716	0,00149
S6	809,79	85,46421	0,00094	45,68003	0,00011	64,09815	0,00009
S7	643,92	81,59035	0,00129	35,28886	0,00013	61,19277	0,00084
S8	7.617,70	323,31040	0,00065	152,83613	0,00023	242,48280	0,00042
S9	1.253,40	121,95967	0,00082	68,20056	0,00018	91,46975	0,00066
S10	2.513,70	180,92661	0,00065	96,58828	0,00008	135,69496	0,00045
S11	4.623,80	255,13452	0,00051	132,32632	0,00035	191,35089	0,00033
S12	4.170,00	285,54008	0,00057	164,80162	0,00031	214,15506	0,00030
S13	1.075,00	81,74385	0,00103	40,33128	0,00009	61,30789	0,00065

A declividade da sub-bacia considera a declividade média de toda a superfície, considerando em seu cálculo os valores de elevação dos vizinhos de cada *raster*. O relevo da sub-bacia considera a diferença de elevação entre a saída até o ponto mais alto no seu divisor, não coincidindo com o ponto a montante do caminho mais longo. A razão de relevo é a divisão do relevo da bacia em relação ao caminho mais longo. Essas características das sub-bacias do Rio Acre, estão apresentadas na Tabela 5.

A razão de alongação das sub-bacias indica que elas possuem formatos alongados, afastando-se do formato circular. Essa característica sugere uma menor propensão a enchentes, uma vez que sub-bacias alongadas tendem a distribuir melhor o fluxo de água (SCHUMM, 1956). Além disso, a densidade de drenagem, que mede a capacidade de escoamento da bacia, foi considerada baixa, embora esse parâmetro varie conforme a área de drenagem informada.

Tabela 5: Características fisiográficas das Sub-bacias do Rio Acre (Parte 02)

Sub-bacia	Declive da Bacia (M/M)	Relevo da Bacia (M)	Taxa de alívio	Razão de Elongação	Densidade de Drenagem (KM/KM ²)
S1	0,15253	206,94000	0,00113	0,37527	0,00019
S2	0,12051	216,96661	0,00100	0,30583	0,05329
S3	0,09987	142,59689	0,00220	0,46877	0,07187
S4	0,13037	208,19153	0,00088	0,32891	0,01869
S5	0,09856	144,02170	0,00248	0,35704	0,14572
S6	0,10598	146,95352	0,00172	0,37571	0,09785
S7	0,09793	119,84271	0,00147	0,35094	0,08722
S8	0,11656	215,60391	0,00067	0,30461	0,02046
S9	0,08104	127,08881	0,00104	0,32755	0,06837
S10	0,08267	135,26381	0,00075	0,31269	0,05572
S11	0,08881	161,75299	0,00063	0,30074	0,02188
S12	0,10335	191,89337	0,00067	0,25519	0,02726
S13	0,07714	97,82816	0,00120	0,45258	0,06878

A Tabela 6 apresenta as características fisiográficas dos trechos dos rios, que podem ser visualizadas na Figura 53. Esses trechos são marcados por declividades baixas e elevada sinuosidade, características típicas dos rios meândricos da região amazônica. Conforme Duarte (2011) o perfil longitudinal de meandros do Rio Acre contribui para frear por gravidade a velocidade das águas, evitando assim picos repentinos de cheias.

Dessa forma, é importante analisar para cada sub-bacia os parâmetros de declividade e sinuosidade de forma conjunta, para assim verificar se essas condições dificultam a propagação de ondas de cheia. Por outro lado, ressalta-se que a característica de meandros do Rio Acre ajuda a amortecer o hidrograma das sub-bacias, reduzindo a intensidade dos picos de vazão durante eventos de cheia.

Na Tabela 6 também foram incluídas informações adicionais utilizadas como parâmetros no HEC-HMS para a propagação de vazões pelo método de Muskingum-Cunge. Entre esses parâmetros estão o comprimento dos trechos, em metros, e a área de drenagem, que foi usada para calcular a largura dos rios por meio da correlação global de Frasson *et al.* (2019).

Além disso, foi utilizado o coeficiente de rugosidade da fórmula de Manning, conforme descrito por Porto (2006), para ajustar as simulações hidrológicas e melhorar a precisão dos resultados. Conforme Lyra *et al.* (2010), o coeficiente de Manning é um parâmetro crucial para descrição do escoamento superficial, tais como nível da água, vazão e velocidade de escoamento, que são essenciais para modelagem hidrológica.

Tabela 6: Características fisiográficas dos trechos dos rios

Trecho de Rios	Comprimento (KM)	Declive (M/M)	Relevo (M)	Sinuosidade	Comprimento (M)	Área de Drenagem (KM ²)	Largura (M)	<i>n</i>
R1	73,91799	0,00009	7	2,10240	73917,99	3.726,1	134,5	0,075
R2	52,14784	0,00012	6,48575	1,92359	52147,84	7.189,8	166,0	0,075
R3	49,36384	0,00026	13,01425	2,23986	49363,84	7.915,1	171,2	0,075
R4	79,23704	0,00011	9	2,20622	79237,04	13.056,0	200,9	0,075
R5	56,17721	0,00019	10,5	1,65646	56177,21	13.865,8	204,8	0,075
R6	85,73402	0,00016	13,5	2,26475	85734,02	14.509,7	207,8	0,075
R7	140,0735	0,00009	13	2,19848	140073,50	23.380,8	242,1	0,075
R8	101,23073	0,00012	12	1,73650	101230,73	25.894,5	250,1	0,075
R9	73,91799	0,00009	7	2,10240	73917,99	34.688,3	274,6	0,075

5.2 Hietogramas de chuva de projeto das sub-bacias do Rio Acre

Como resultado da caracterização fisiográfica da bacia, a Tabela 7 apresenta os tempos de concentração, tanto em horas quanto em minutos, assim como o tempo de pico do hidrograma, que está diretamente relacionado ao tempo de concentração. Esses valores são essenciais para a compreensão do comportamento hidrológico da bacia, especialmente em relação à propagação de ondas de cheia e à resposta do sistema hídrico a eventos de precipitação.

Tabela 7: Tempo de concentração e tempo de pico (lag time)

Sub-bacia	Caminho Mais Longo Comprimento (KM)	Caminho Centroide Comprimento (KM)	Caminho 10-85 Declive (M/M)	Tempo de Concentração (horas)	Tempo de Concentração (min)	Tempo de Pico (min)
S1	183,54301	81,51051	0,00080	23,826	1.429,56	857,74
S2	217,14265	111,05894	0,00044	30,075	1.804,50	1.082,70
S3	64,82587	33,58584	0,00130	12,426	745,56	447,34
S4	237,74043	119,50212	0,00053	30,721	1.843,26	1.105,96
S5	58,15621	27,73482	0,00149	11,126	667,56	400,54
S6	85,46421	45,68003	0,00009	22,098	1.325,88	795,53
S7	81,59035	35,28886	0,00084	14,427	865,62	519,37
S8	323,31040	152,83613	0,00042	37,558	2.253,48	1.352,09
S9	121,95967	68,20056	0,00066	20,564	1.233,84	740,30
S10	180,92661	96,58828	0,00045	27,214	1.632,84	979,70
S11	255,13452	132,32632	0,00033	34,736	2.084,16	1.250,50
S12	285,54008	164,80162	0,00030	38,928	2.335,68	1.401,41
S13	81,74385	40,33128	0,00065	15,615	936,90	562,14

Na Tabela 7, a segunda coluna apresenta o comprimento do caminho mais longo, enquanto a terceira coluna mostra o comprimento do caminho centroide. A declividade do caminho 10-85 também está incluída, sendo um parâmetro importante para o cálculo da

velocidade de escoamento. A quarta coluna apresenta o tempo de concentração, calculado com base na metodologia do Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos, expresso em horas, e a quinta coluna converte esse tempo para minutos. Por fim, a sexta coluna exhibe o tempo de pico, ou "*lag time*", que é o intervalo entre o início da precipitação e o pico do hidrograma, refletindo o tempo que o fluxo de água leva para alcançar a máxima vazão na bacia.

Os tempos de concentração calculados com base na fórmula do Corpo de Engenheiros dos EUA mostraram-se inferiores aos obtidos por outros métodos, incluindo a fórmula apresentada por Silveira (2005). Essa diferença pode ser atribuída às particularidades de cada metodologia, conforme Silveira (2005) recomenda-se a aplicação da fórmula dos engenheiros dos EUA para bacias com áreas de até 12.000 km² e características rurais, como baixa densidade demográfica. Dado que as sub-bacias do estudo possuem essas características, essa fórmula foi adotada neste trabalho, mesmo sendo conhecida por gerar tempos de concentração menores.

A escolha desse método é fundamental, pois o tempo de concentração afeta diretamente a previsão e a gestão de cheias e escoamentos em bacias hidrográficas. Embora a fórmula dos engenheiros dos EUA possa resultar em tempos menores, ela se mostrou adequada para o contexto deste estudo. No entanto, essa decisão impacta a precisão das simulações hidrológicas, o que reforça a importância de selecionar o método de cálculo mais apropriado para cada cenário específico, visando obter resultados mais confiáveis.

O Gráfico 2 apresenta o hietograma de chuva de projeto para a sub-bacia S1, localizada a montante da cidade de Assis Brasil. O tempo de duração da chuva foi de 60 horas, um valor cerca de 151,84% maior do que o tempo de concentração calculado. O hietograma foi distribuído em intervalos de 3 horas, resultando em uma precipitação total de 141,36 mm após a aplicação de um fator de redução de 0,62.

Esse tipo de análise, com a aplicação de fatores de redução, é essencial para ajustar os valores de precipitação aos cenários reais, permitindo uma modelagem mais precisa das condições locais e uma melhor compreensão do comportamento da sub-bacia durante eventos de chuva prolongada.

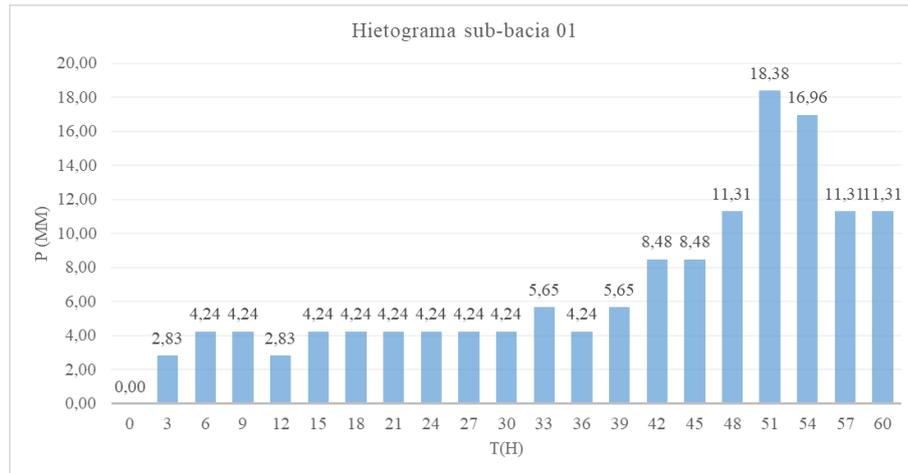


Gráfico 2: Hietograma de chuva de projeto para sub-bacia 01 com TR = 100 anos

Para a sub-bacia S2, o hietograma de chuva de projeto é apresentado no Gráfico 3. Esta sub-bacia está localizada a montante dos municípios de Brasiléia e Eptaciolândia, e a jusante de Assis Brasil. Embora tenha uma área menor em comparação com a sub-bacia S1 e utilize a mesma curva IDF de Brasiléia, a precipitação total foi maior, alcançando 156 mm após a aplicação de um fator de redução de área de 0,65. Isso ocorre porque o tempo de concentração da sub-bacia S2 é 26,2% maior que o da S1, devido ao comprimento do talvegue ser 18,3% maior e à declividade do caminho 10-85 ser aproximadamente 45% menor.

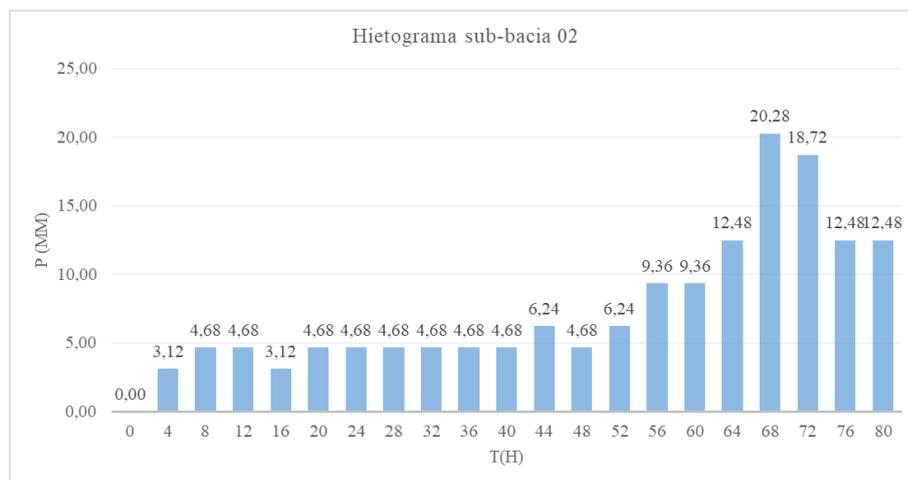


Gráfico 3: Hietograma de chuva de projeto para sub-bacia 02 com TR = 100 anos

Para as sub-bacias S3 e S5, que possuem áreas menores, os hietogramas de projeto mostram uma duração de chuva de 40 horas, com intervalos de 2 horas, localizados entre os municípios de Eptaciolândia e Xapuri, ao longo do escoamento do Rio Acre. Nessas sub-bacias, a precipitação total foi de 171,72 mm para a S3 e 184,44 mm para a S5. Os fatores de redução de área aplicados foram de 0,81 e 0,87, respectivamente, conforme ilustrado nos

Gráfico 4 e Gráfico 5. Essas variações refletem as características fisiográficas distintas das sub-bacias e sua influência nos padrões de precipitação e escoamento.

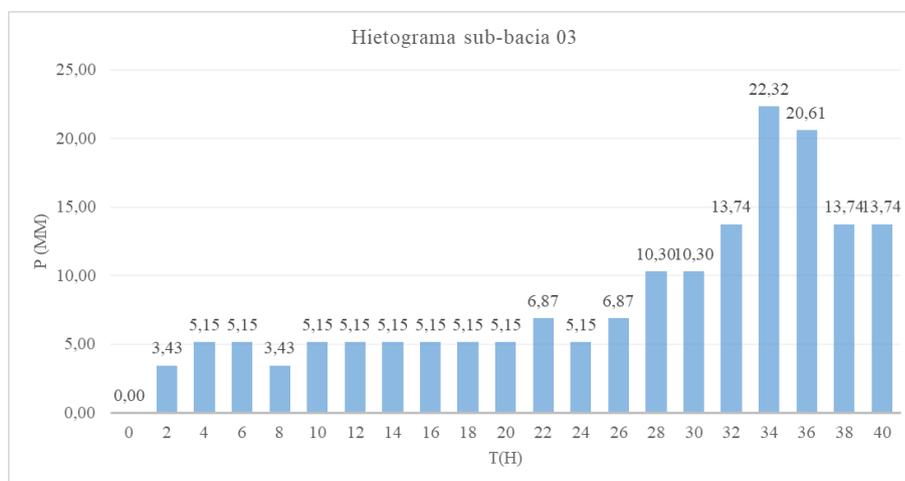


Gráfico 4: Hietograma de chuva de projeto para sub-bacia 03 com TR = 100 anos

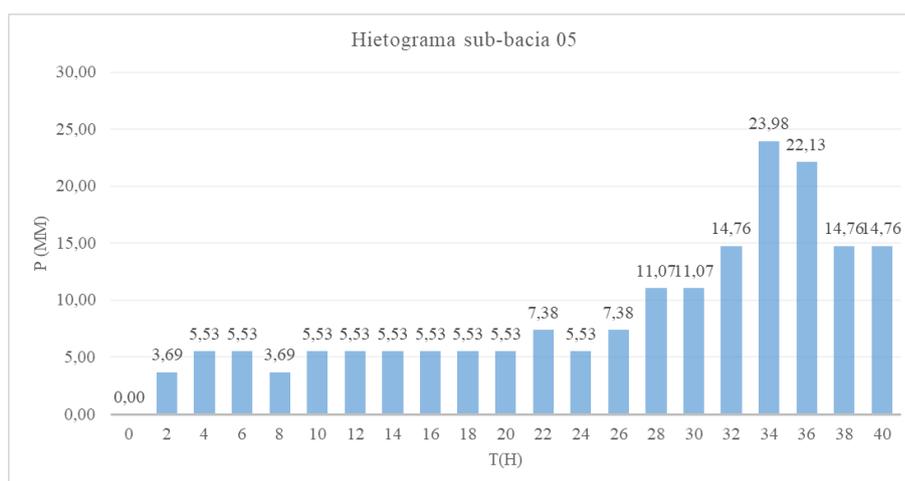


Gráfico 5: Hietograma de chuva de projeto para sub-bacia 05 com TR = 100 anos

A curva IDF utilizada para o cálculo da intensidade da chuva na sub-bacia S4 foi a de Xapuri, sendo esta sub-bacia localizada a montante da cidade. O tempo de duração da chuva foi de 80 horas, representando aproximadamente 160,42% do tempo de concentração da bacia. A precipitação foi distribuída em intervalos de 4 horas, resultando em uma precipitação total de 141,60 mm após a aplicação de um fator de redução de área de 0,59, conforme mostrado no hietograma de chuva de projeto no Gráfico 6. Essa abordagem, ao considerar a redução de área e o prolongamento do tempo de chuva, reflete as condições específicas de escoamento da sub-bacia S4.

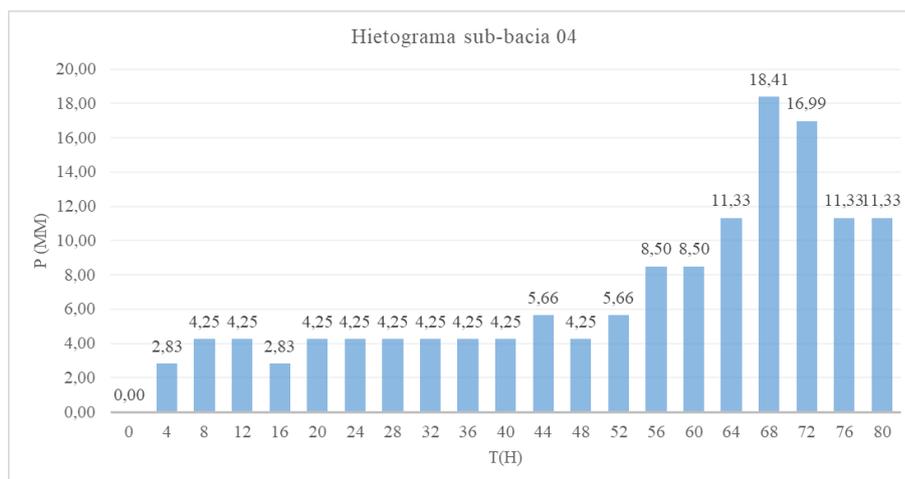


Gráfico 6: Hietograma de chuva de projeto para sub-bacia 04 com TR = 100 anos

Já para a sub-bacia S6, localizada a jusante da cidade de Xapuri, o hietograma apresenta uma duração de chuva de 60 horas, distribuída em intervalos de 3 horas, conforme o Gráfico 7. A precipitação total alcançou 186,96 mm, sendo aplicado um fator de redução de área de 0,82. Essa sub-bacia, com um tempo de chuva mais curto e maior volume de precipitação, reflete a influência de sua localização e das características fisiográficas, que favorecem um escoamento mais intenso. A combinação desses parâmetros no cálculo da precipitação e da distribuição temporal da chuva proporciona uma análise detalhada das condições hidrológicas da bacia.

Conforme Collischonn e Dornelles (2013), para a obtenção das chuvas de projeto em bacias de grandes dimensões, é comum a aplicação de fatores de redução. Isso se deve à necessidade de compensar o fato de que, em áreas extensas, a intensidade média das chuvas tende a ser menor, já que os eventos de precipitação não ocorrem de maneira uniforme em toda a bacia.

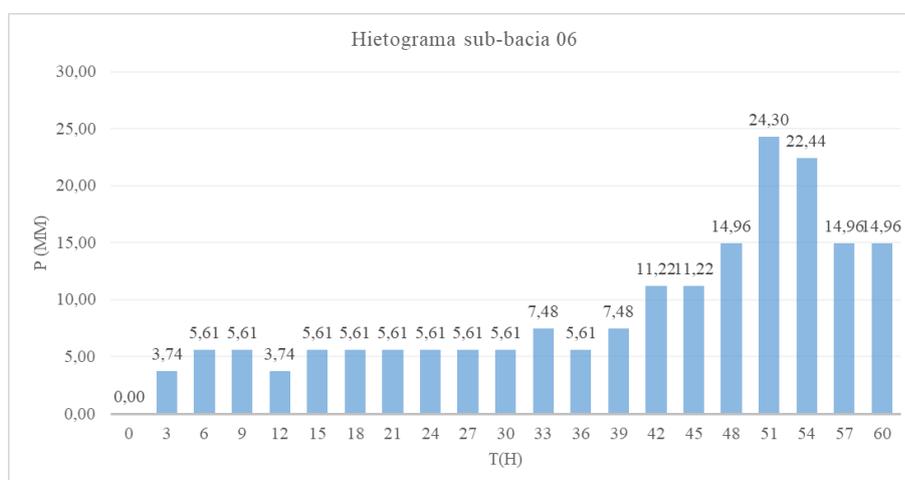


Gráfico 7: Hietograma de chuva de projeto para sub-bacia 06 com TR = 100 anos

Para a sub-bacia S7, o hietograma de chuva de projeto é apresentado no Gráfico 8. Localizada a montante do município de Xapuri e a jusante de Capixaba, essa sub-bacia, apesar de ser a segunda menor em área, registrou uma precipitação total de 175,96 mm após a aplicação de um fator de redução de área de 0,83. A duração da chuva foi de 40 horas, distribuída em intervalos de 2 horas, refletindo as características hidrológicas específicas da sub-bacia. O uso de um fator de redução para áreas menores ajuda a ajustar as intensidades de precipitação, proporcionando uma análise mais adequada do escoamento e das condições de cheia.

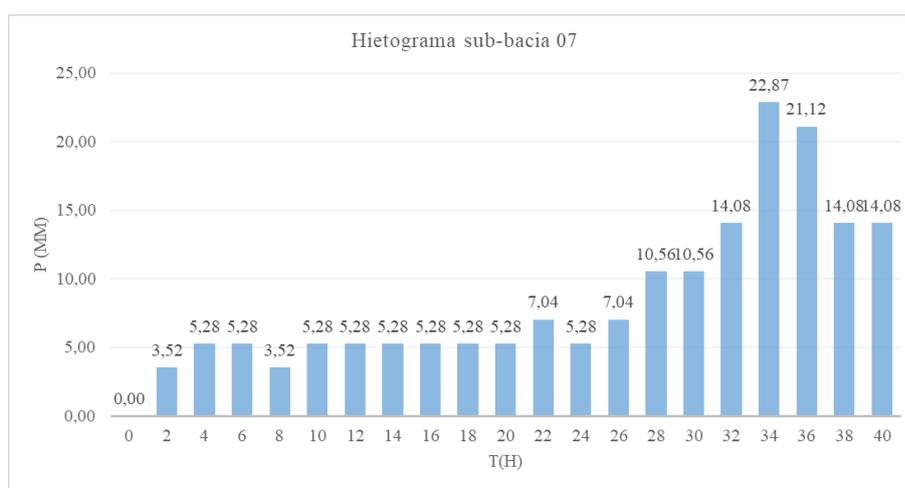


Gráfico 8: Hietograma de chuva de projeto para sub-bacia 07 com TR = 100 anos

Já para a sub-bacia S8, a curva IDF utilizada foi a de Rio Branco, sendo essa sub-bacia localizada a montante da cidade. O tempo de duração da chuva foi de 80 horas, aproximadamente 113% maior que o tempo de concentração, com precipitação distribuída em intervalos de 4 horas. A precipitação total foi de 115,20 mm, após a aplicação de um fator de redução de área de 0,48, o menor entre as sub-bacias estudadas. Isso se deve ao fato de a S8 possuir a maior área e o maior comprimento do Rio Espalha. Embora a sub-bacia não apresente o maior tempo de concentração, isso se deve às declividades predominantes, que são menores em comparação à sub-bacia S12, conforme ilustrado no hietograma de chuva de projeto do Gráfico 9.

No Gráfico 10 é apresentado o hietograma de chuva de projeto para a sub-bacia S9, localizado entre Capixaba e Rio Branco, com tempo de duração da chuva em 60 horas, aproximadamente 191,78% maior que o tempo de concentração, distribuídos em intervalos de tempos de 3 horas, com precipitação total de 182,52 mm após a aplicação do fator de redução de chuva de 0,78.

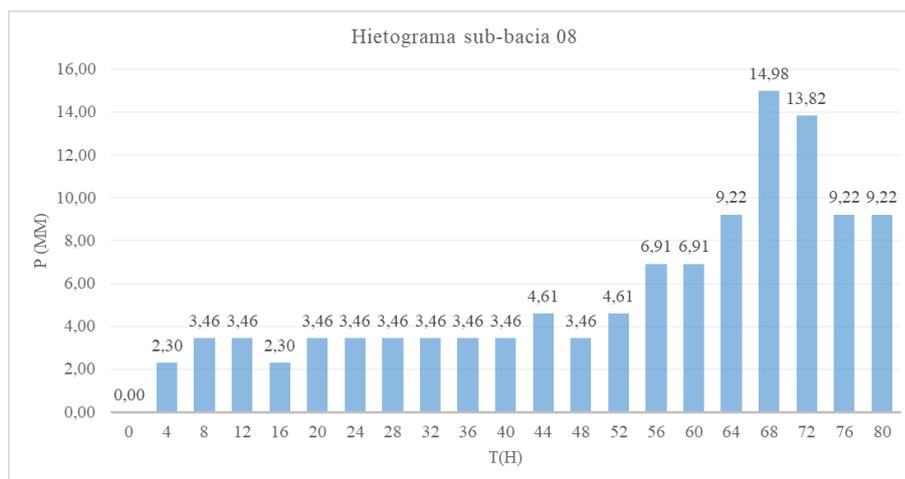


Gráfico 9: Hietograma de chuva de projeto para sub-bacia 08 com TR = 100 anos

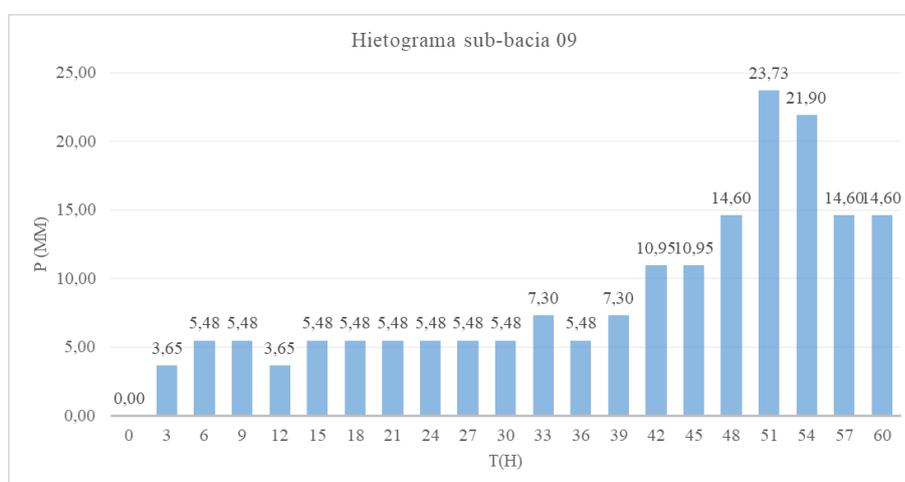


Gráfico 10: Hietograma de chuva de projeto para sub-bacia 09 com TR = 100 anos

No hietograma para a sub-bacia S10, apresenta duração da chuva em 60 horas, com distribuição temporal de 3 horas e precipitação total de 159,12 mm com fator de redução de área em 0,68, conforme Gráfico 11, localizado a montante da cidade de Porto Acre. A IDF adotada para o cálculo da intensidade da chuva na sub-bacia 10 e as demais subsequentes é a de Rio Branco, devido a carência de informações de equações IDF atualizadas para as áreas das sub-bacias.

Conforme Back e Cadorin (2020), no Acre, existem apenas 11 estações meteorológicas com séries de dados extensas (com 15 anos ou mais) e poucas falhas, distribuídas em 10 dos 22 municípios do estado. Essas estações estão predominantemente situadas nas áreas mais urbanizadas, especialmente nas regiões leste e oeste, apenas cinco na bacia do Rio Acre. Além disso, há uma escassez de dados pluviométricos na região central, que abriga a maioria das unidades de conservação estaduais e federais. As séries de máximas diárias anuais mostraram médias que variam entre 89,6 mm e 118,7 mm.

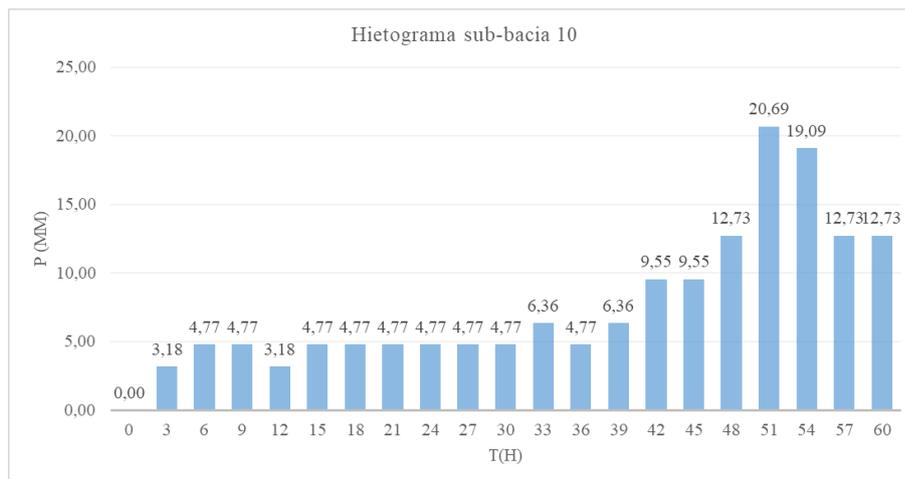


Gráfico 11: Hietograma de chuva de projeto para sub-bacia 10 com TR = 100 anos

Os Gráfico 12 e Gráfico 13 apresentam os hietogramas de chuva de projeto para as sub-bacias S11 e S12, localizadas a montante da cidade Floriano Peixoto e a jusante de Porto Acre. O tempo de duração da chuva para ambas as sub-bacias foi de 80 horas, com distribuição em intervalos de 4 horas. As precipitações totais foram de 144 mm para a S11 e 148,8 mm para a S12, após a aplicação de fatores de redução de área de 0,60 e 0,62, respectivamente.

As duas sub-bacias possuem áreas semelhantes, mas a S12 se destaca por conter o Rio Antimari, que apresenta o segundo maior comprimento dentro da bacia do Rio Acre. Esse fator contribui para que a S12 tenha o maior tempo de concentração entre todas as sub-bacias analisadas, o que influencia diretamente na dinâmica de escoamento e propagação das ondas de cheia.

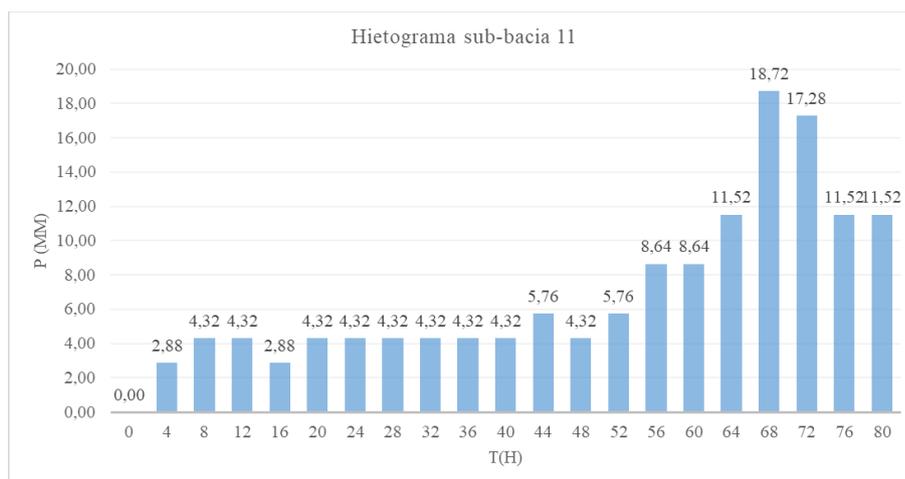


Gráfico 12: Hietograma de chuva de projeto para sub-bacia 11 com TR = 100 anos

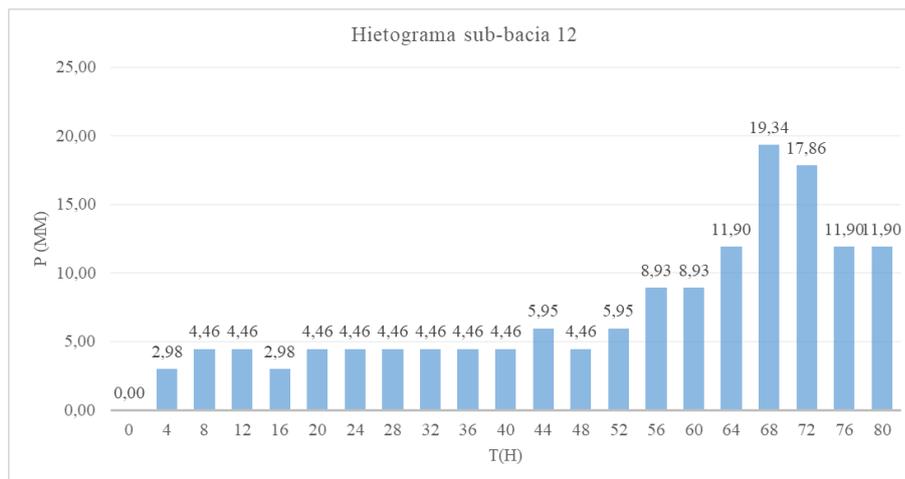


Gráfico 13: Hietograma de chuva de projeto para sub-bacia 12 com TR = 100 anos

Por fim, a sub-bacia S13, localizada a jusante da cidade Floriano Peixoto e a montante de Boca do Acre, apresentou um tempo de duração da chuva de 40 horas, com distribuição em intervalos de 2 horas. A precipitação total registrada foi de 166,32 mm, após a aplicação de um fator de redução de área de 0,77, conforme ilustrado no Gráfico 14.

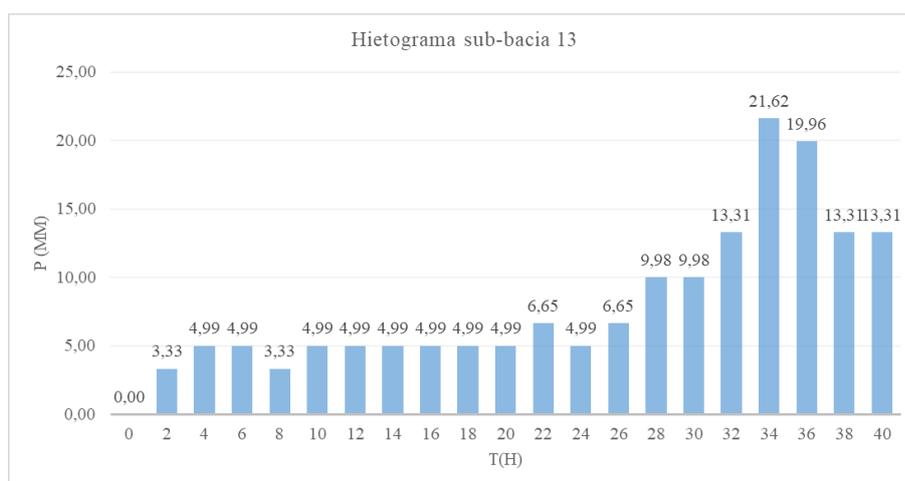


Gráfico 14: Hietograma de chuva de projeto para sub-bacia 13 com TR = 100 anos

Nos apêndices A, B, C e D, são apresentados os hietogramas para os tempos de retorno de 100, 50, 25 e 5 anos. Neste item, concentramos a análise apenas no hietograma de 100 anos, para evitar repetições nos resultados apresentados.

5.3 Curve Number da Bacia do Rio Acre

Com a discretização da bacia hidrográfica do Rio Acre em células de 2.000m no HEC-HMS e com o conjunto de dados do GCN250, foi possível encontrar o *Curve Number* das sub-bacias e apresentadas em mapas para futuros trabalhos locais.

Na aplicação do método da curva número do SCS, foi fundamental determinar o parâmetro CN para cada sub-bacia. Os valores desse parâmetro são influenciados pelo tipo e uso do solo (Tucci, 2009). Embora o fato de o CN ser o único parâmetro do método SCS seja frequentemente apresentado como uma vantagem, essa singularidade traz consigo uma considerável sensibilidade da modelagem hidrológica em relação às variações desse parâmetro. Para Pompermayer (2013), os fatores que influenciam a definição do parâmetro CN incluem tipos de solo, cobertura vegetal, práticas agrícolas, condições hidrológicas e escoamento preexistente.

Existem diversas abordagens para essa determinação, incluindo a análise visual de mapas temáticos, o reconhecimento de campo e métodos de correlação com a densidade urbana. Nesse sentido, o presente estudo utilizou conjunto de dados *Curve Number* (CN) globais para modelagem e projeto hidrológico em arquivo *raster* no formato Geotiff na resolução espacial de 250 m, para condições de escoamento antecedente médio, seco e úmido, realizado por Jaffar, Ahmad e El Beyrouthy (2019).

Na Figura 57, é apresentado o mapa de CN com umidade antecedente ao escoamento, verifica-se que os valores variam de 87,1 à 89,1 e que as bacias localiza a jusante de Rio Branco S10, S11, S12 e S13, apresentam os maiores valores de CN.

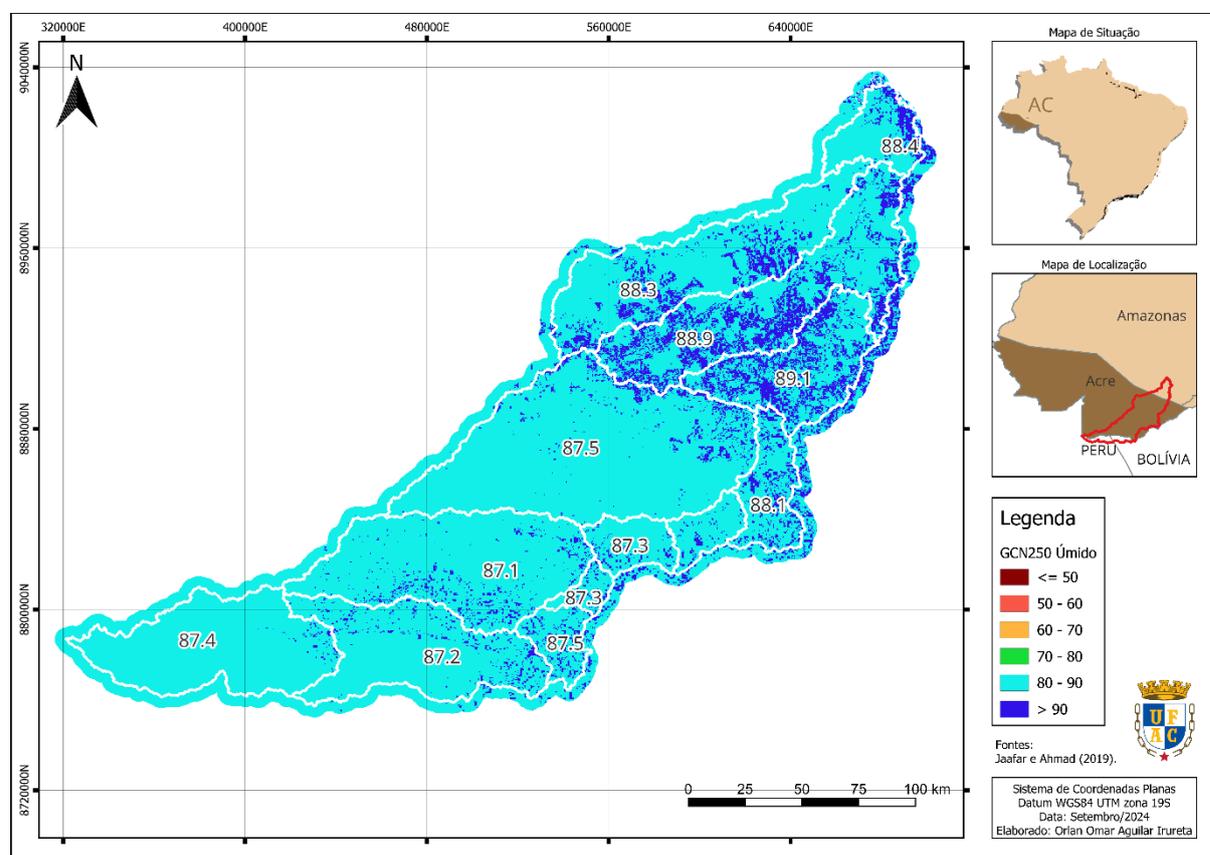


Figura 57: Curve Number global (GCN250) da Bacia do Rio Acre, condição antecedente úmido

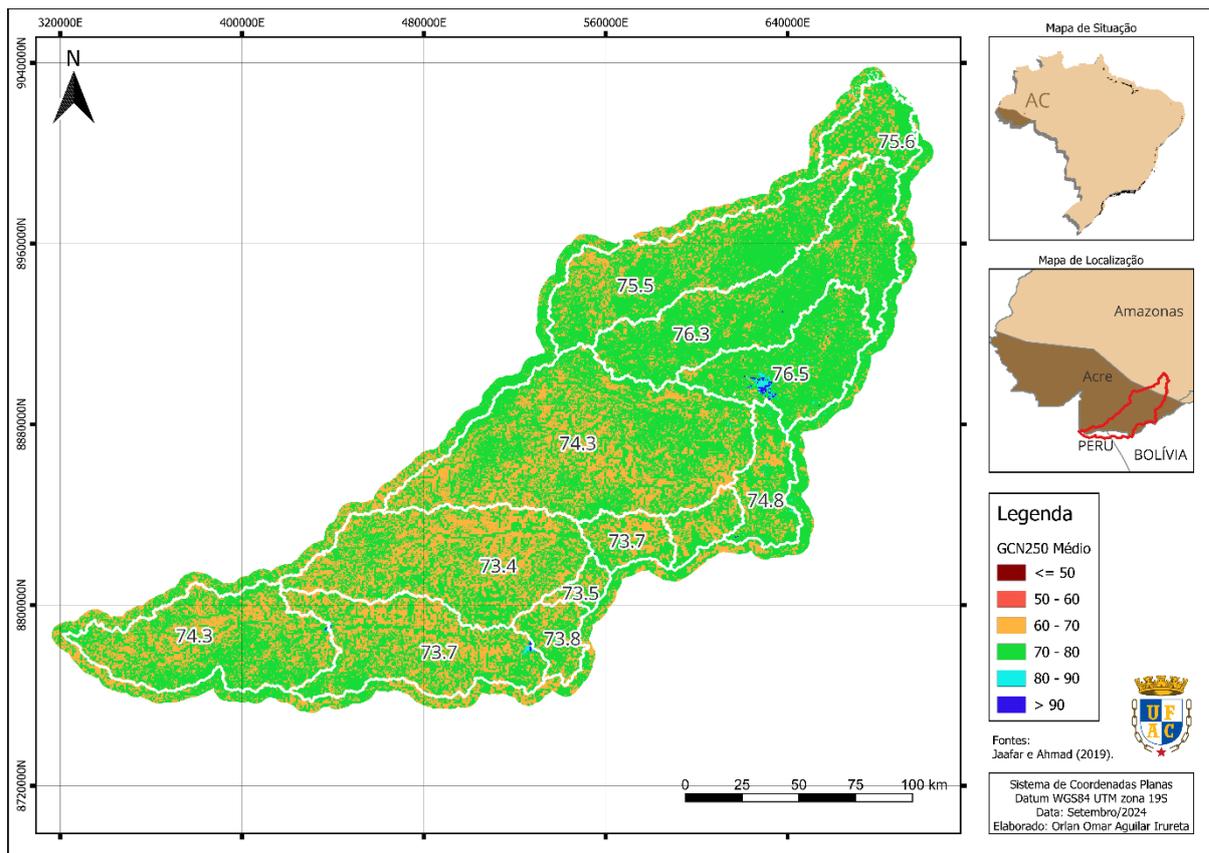


Figura 58: Curve Number global (GCN250) da Bacia do Rio Acre, condição antecedente médio

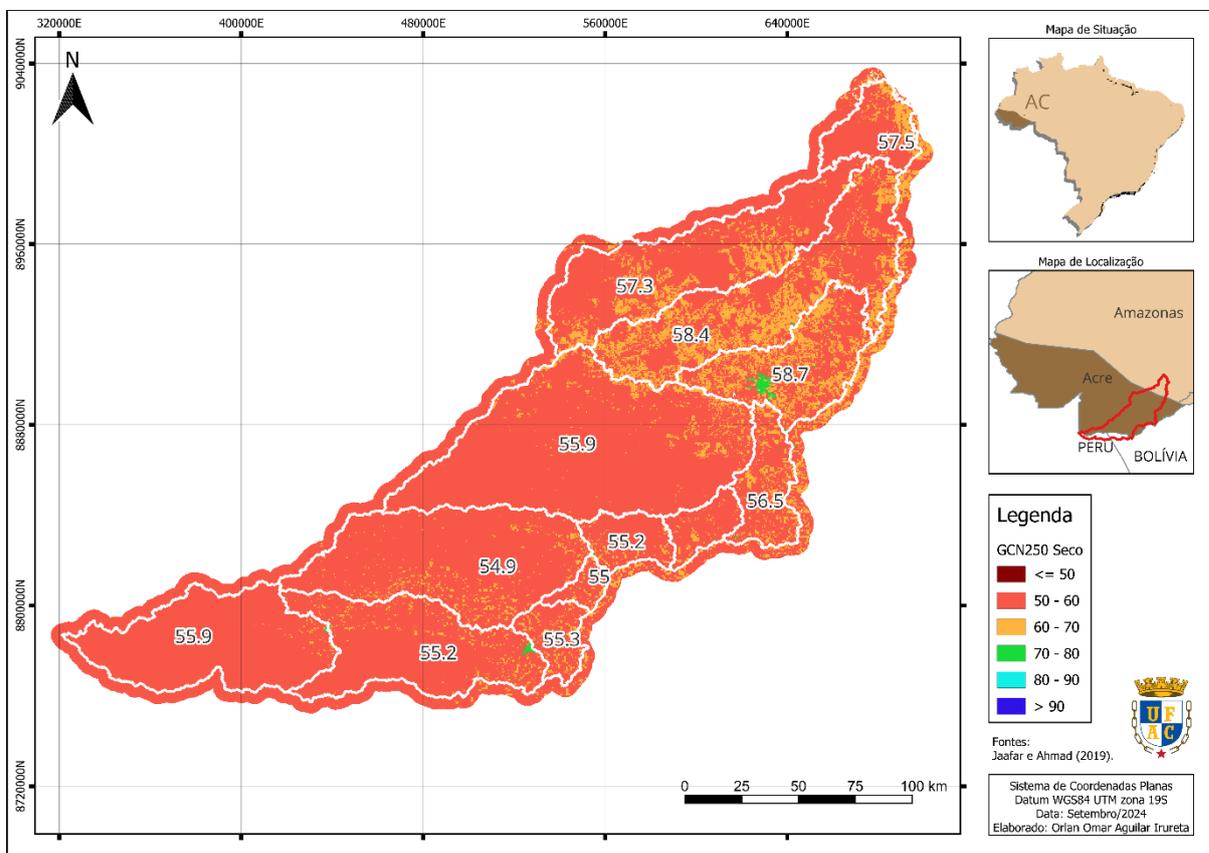


Figura 59: Curve Number Global (GCN250) da Bacia do Rio Acre, condição antecedente seco

Na Figura 58, apresenta-se o mapa de CN médio, verifica-se que os valores variam de 73,4 à 76,5, no entanto, manchas com valores de CN acima de 80 são encontradas nas áreas urbanizadas, localizadas nas sedes municipais. Também existe predominância de valores abaixo de 70, isto se deve a grande presença de florestas a montante de Xapuri e em território estrangeiro a montante de Assis Brasil e Brasiléia.

Na Figura 59, apresenta-se o mapa de CN seco, verifica-se que os valores variam de 54,9,4 à 58,7, no entanto, manchas com valores de CN acima de 70 são encontradas predominante nas cidades de Assis Brasil, Brasiléia, Epitaciolândia, Xapuri e Rio Branco. Valores acima de 60, são encontrados nas áreas densamente urbanizadas como em S10 e S11.

Na Tabela 8, apresenta-se a tabulação do *Curve Number* para cada sub-bacia nas condições antecedentes úmido, médio e seco, assim como, seus respectivos valores de abstração inicial que foram alimentados na simulação do HEC-HMS. Os valores de abstração inicial representam a parcela da chuva que é interceptada pela vegetação ou infiltrada no solo, compatível com os valores de CN, pois quanto mais úmido, a capacidade do solo saturado de absorver precipitação é menor, com valores em média de 7mm, e na condição seca uma capacidade de absorção maior em média de 40mm.

De acordo, com estudos realizados por Jaafar, Ahmad e El Beyrouthy (2019), o CN em condições médias para a bacia hidrográfica da Amazônia varia entre 70 e 80, já para Zen *et al.* (2017), apresenta o CN com valor de 64,5 para a bacia da Amazônia. Desta forma, foram adotados os valores com a condições médias de escoamento antecedente para as simulações no HEC-HMS.

Tabela 8: *Curve Number* e abstração inicial da Bacia do Rio Acre

Sub-bacia	Úmido		Médio		Seco	
	Abstração Inicial (MM)	Curve Number	Abstração Inicial (MM)	Curve Number	Abstração Inicial (MM)	Curve Number
S1	7,29	87,4	17,6	74,3	40,1	55,9
S2	7,43	87,2	18,1	73,7	41,2	55,2
S3	7,22	87,5	18,0	73,8	41,1	55,3
S4	7,55	87,1	18,4	73,4	41,8	54,9
S5	7,39	87,3	18,3	73,5	41,6	55,0
S6	7,38	87,3	18,1	73,7	41,3	55,2
S7	7,25	87,5	17,7	74,1	40,5	55,7
S8	7,24	87,5	17,6	74,3	40,1	55,9
S9	6,86	88,1	17,1	74,8	39,2	56,5
S10	6,19	89,1	15,6	76,5	35,8	58,7
S11	6,31	88,9	15,8	76,3	36,2	58,4
S12	6,73	88,3	16,5	75,5	37,8	57,3
S13	6,66	88,4	16,4	75,6	37,5	57,5

5.4 Vazões máximas simuladas no HEC-HMS

O modelo hidrológico distribuído é apresentado na Figura 60, o elemento hidrológico da sub-bacia é representado pelo símbolo , os quais são alimentados pelo hietogramas de chuvas, os elementos de junção representados pelo símbolo , a vinculação das junções pelos trecho de rios representado por uma linha azul, e por fim o elemento do exutório representado pelo elemento hidrológico .

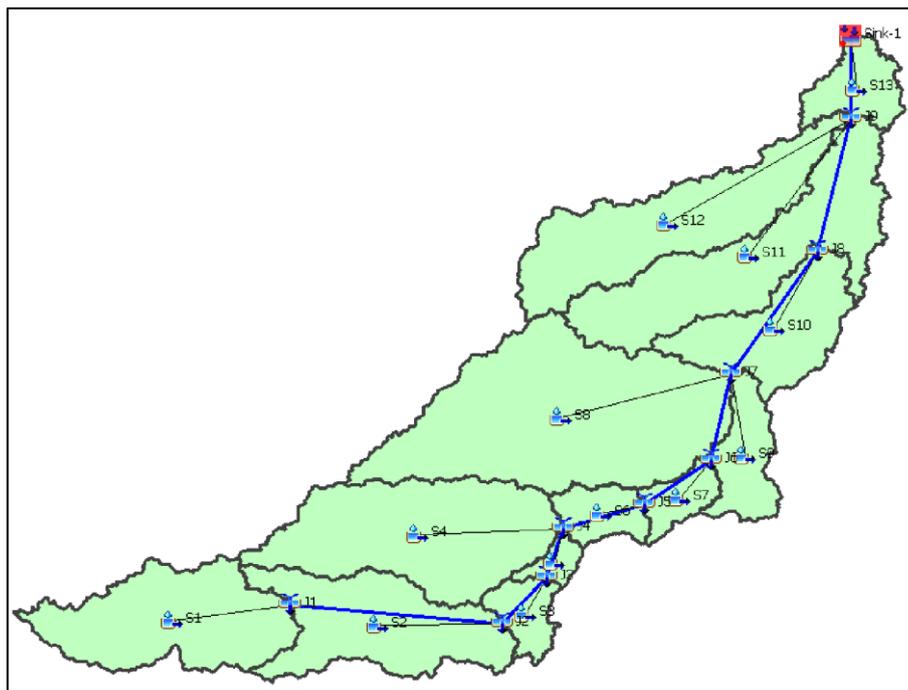


Figura 60: Modelo hidrológico da Bacia do Rio Acre

As vazões de entrada nos trechos dos rios foram ajustadas para obter a vazão de referência para que o HEC-HMS possa a propagação de vazão. A vazão de referência representando em 70% da vazão máxima na entrada do trecho do rio, ajustado de montante para jusante, para os tempos de retorno de 100, 50, 25 e 5 anos, conforme mostrado na Tabela 9.

Tabela 9: Vazões de referência para o método Muskingum-Cunge

Trecho de Rios	TR ₁₀₀		TR ₅₀		TR ₂₅		TR ₅	
	Q _{máx.entrada}	Q _{ref}	Q _{máx.entrada}	Q _{ref}	Q _{máx}	Q _{ref}	Q _{máx}	Q _{ref}
R1	2682,6	1877,8	2376,5	1663,6	2071,4	1450,0	1384,1	968,9
R2	3031,4	2122,0	2621,0	1834,7	2313,3	1619,3	1470,7	1029,5
R3	2271,8	1590,3	1912,0	1338,4	1639,7	1147,8	948,8	664,2
R4	4086,4	2860,5	3278,6	2295,0	2666,1	1866,3	1300,7	910,5
R5	2775,8	1943,1	2262,7	1583,9	1900,8	1330,6	991,5	694,1
R6	2600,5	1820,4	2134,7	1494,3	1800,5	1260,4	954,8	668,4
R7	3237,1	2266,0	2819,5	1973,7	2325,3	1627,7	1407,3	985,1
R8	2338,7	1637,1	1909,0	1336,3	1580,9	1106,6	1016,8	711,8
R9	5487,8	3841,5	4807,4	3365,2	3963,4	2774,4	2373,4	1661,4

Analisando os hidrograma gerados e hietogramas gerados pelos HEC_HMS de montante para jusante, a começar pelas sub-bacia S1, verifica-se no hidrograma que o pico de vazão é de 2.682,6 m³/s. A precipitação mostrada no hietograma, apresentam uma perda de 68,98mm de volume, representado em vermelho, em relação ao total precipitado no valor de 141,35mm, ou seja, o volume excedente que virou escoamento é de 72,37mm afetando o hidrograma, representado em azul, conforme Figura 61.

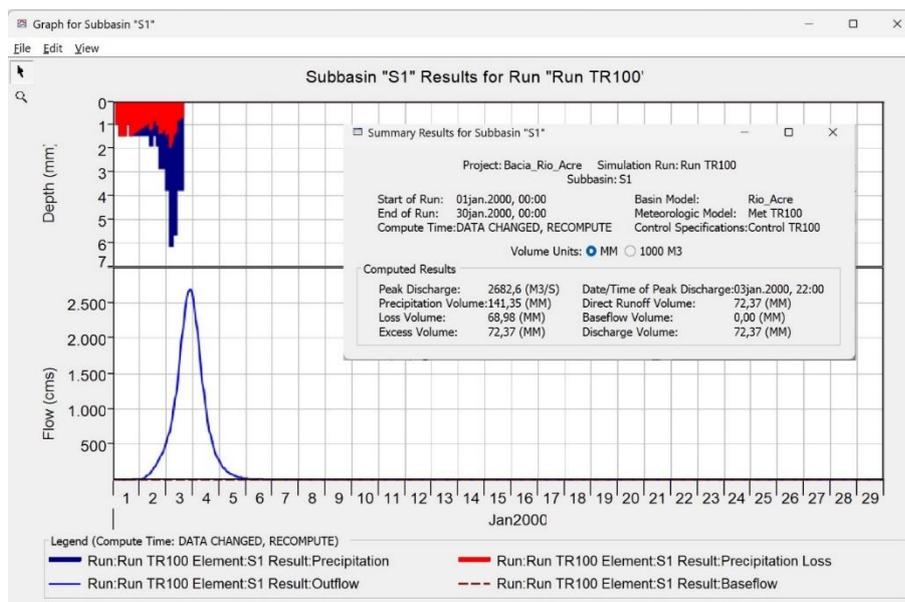


Figura 61: Hietograma e hidrograma da sub-bacia S1

A junção serve para realizar a convolução dos hidrograma, no entanto, como nesta junção apenas possui uma entrada, só ocorrer a transferência, conforme Figura 62. A junção J1 é importante para compara as vazões observadas do posto fluviométrico 13450000, localizado em Assis Brasil.

A partir da Figura 62, no trecho de rio R1, verifica-se na linha tracejada o hidrograma de entrada, ou seja, no início do rio, localizado próximo a J1 e a linha continua em azul representando o hidrograma de saída, localizado próximo a J2, verifica-se o amortecimento do hidrograma, resultando num pico de vazão de 1.004,4 m³/s e 54,43mm de volume, com propagação da onda em torno de 6 horas entre os picos.

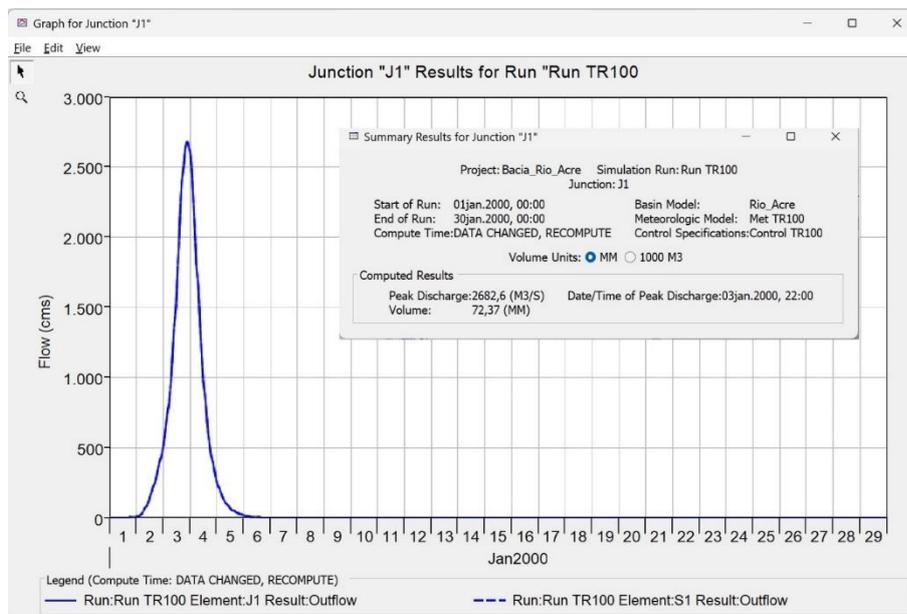


Figura 62: Hidrograma da junção J1

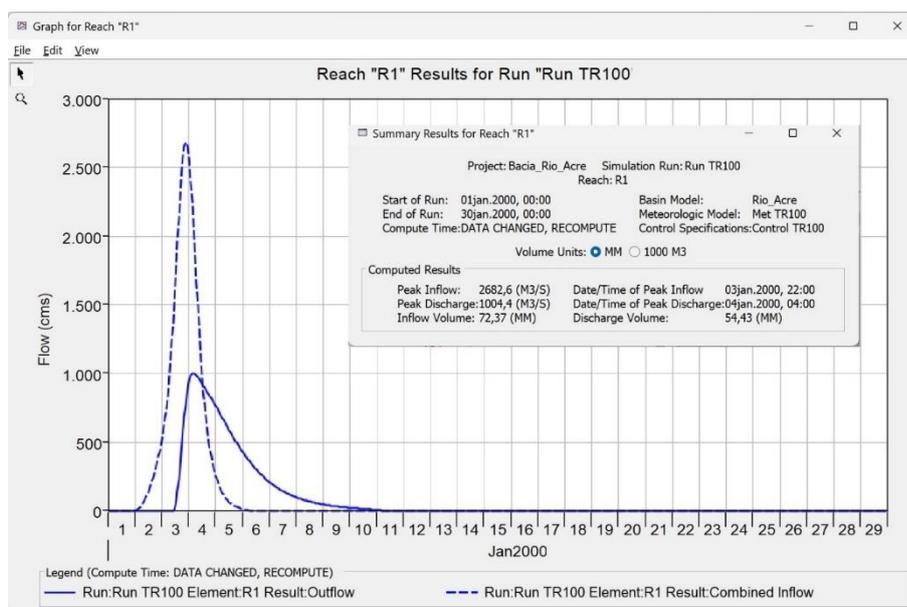


Figura 63: Hidrograma de entrada e saída do trecho de rio R1

Na sub-bacia S2, o hidrograma gerado pelo HEC-HMS revela uma perda de 68,98 mm de volume, representada em vermelho, indicando a quantidade de precipitação que não contribuiu para o escoamento superficial, seja por infiltração ou outras formas de perda. O volume excedente, que se converteu em escoamento, foi de 83,21 mm, mostrado em azul no gráfico, o que resulta em uma precipitação total de 156 mm. Esse volume precipitado, ao ser processado no modelo hidrológico, gerou um pico de vazão de 2.201,6 m³/s. Esses resultados, conforme ilustrado na Figura 64, demonstram a dinâmica do escoamento na sub-bacia S2, onde o balanço entre precipitação, perdas e escoamento excedente influencia diretamente o

hidrograma, ressaltando a importância das características fisiográficas da sub-bacia no comportamento da vazão e na propagação da onda de cheia ao longo do sistema fluvial.

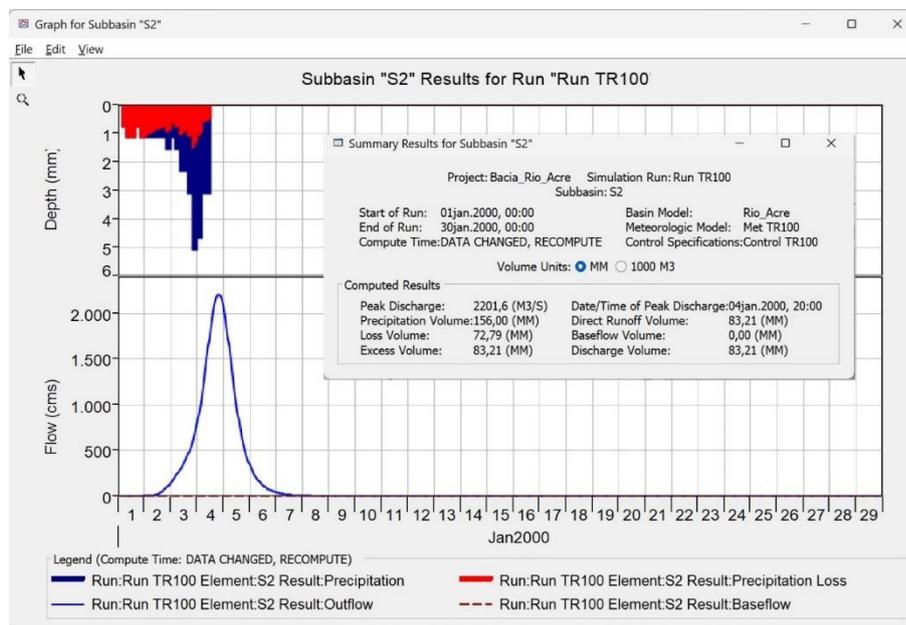


Figura 64: Hietograma e hidrograma da sub-bacia S2

Na junção J2, ocorre a convolução dos hidrogramas provenientes da sub-bacia S2, representada por uma linha pontilhada, e do trecho de rio R1, representado por uma linha tracejada. O resultado dessa convolução é um hidrograma com pico de vazão de 3.031,4 m³/s e um volume de 68,3 mm, conforme ilustrado na Figura 65. A junção J2 desempenha um papel crucial na análise, pois permite comparar as vazões simuladas com as observadas no posto fluviométrico 13470000, localizado no município de Brasília. Esse ponto de comparação é fundamental para validar a precisão do modelo hidrológico aplicado à bacia.

No trecho de rio R2, o hidrograma de entrada, resultante da convolução realizada em J2, é representado por uma linha tracejada. A linha contínua em azul no gráfico indica o hidrograma de saída ao final do trecho. Observa-se um amortecimento do hidrograma ao longo do percurso, com o pico de vazão reduzido para 2.271,8 m³/s e o volume de escoamento ajustado para 63,22 mm. Além disso, há uma translação do pico da onda de cheia em aproximadamente 6 horas, o que reflete a propagação mais lenta da vazão nesse trecho do rio, conforme indicado na Figura 66.

Conforme Collischonn e Dornelles (2013), a convolução é uma técnica na modelagem hidrológica, utilizada para calcular hidrogramas resultantes a partir de hidrogramas unitários, seguindo os princípios da proporcionalidade e superposição. Essa técnica permite combinar os

efeitos de diferentes contribuições de sub-bacias e trechos de rio, gerando um hidrograma resultante que reflete o comportamento do sistema como um todo.

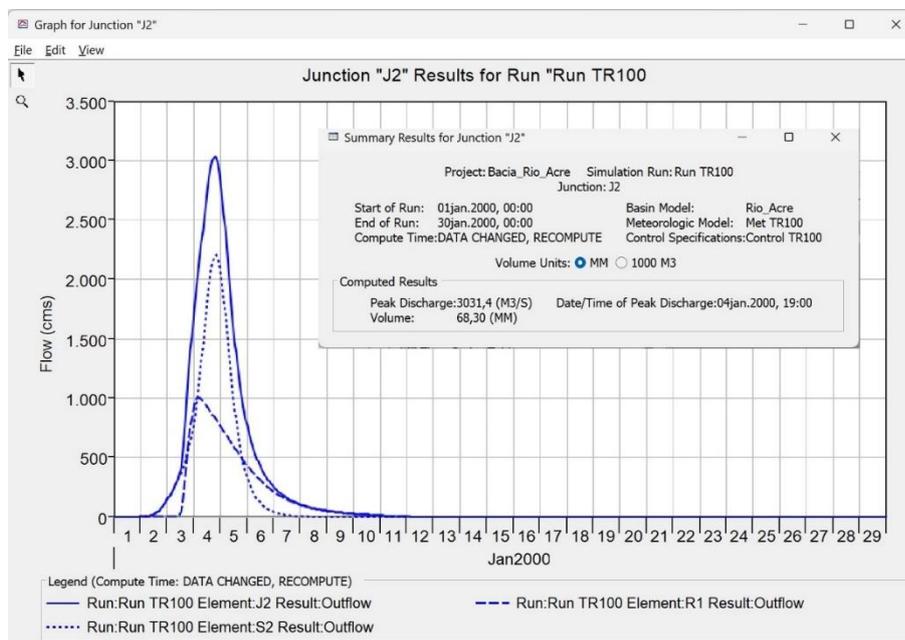


Figura 65: Hidrograma da junção J2

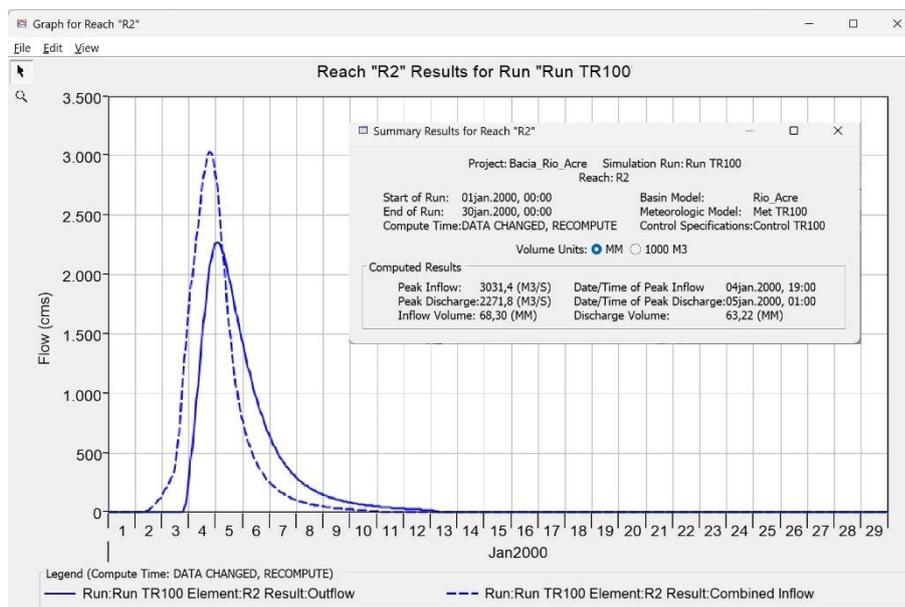


Figura 66: Hidrograma de entrada e saída do trecho de rio R2

Na sub-bacia S3, verifica-se a cor vermelha no hietograma, uma perda de 74,83mm de volume, e em azul o volume excedente que virou escoamento é de 96,87mm, totalizando um volume precipitado no valor de 171,70mm, gerando um pico de vazão é de 1.136,9 m³/s, conforme Figura 67.

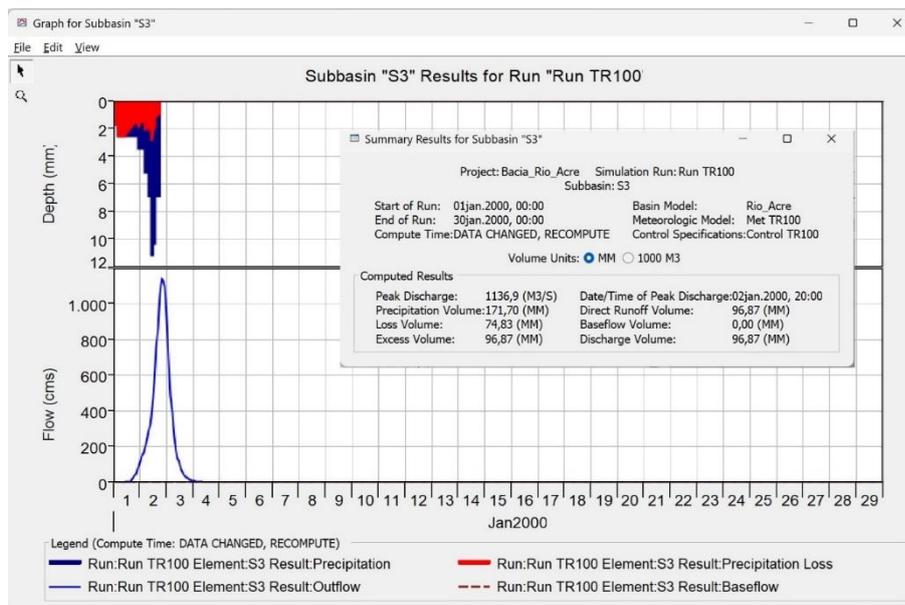


Figura 67: Hietograma e hidrograma da sub-bacia S3

Na junção J3, ocorre a convolução dos hidrograma resultantes da sub-bacia S3 representado e do trecho de rio R2, no entanto, os picos de vazão são em momentos distintos, assim o hidrograma da sub-bacia S3, na primeira onda, não impacta no hidrograma da segunda onda, permanecendo o pico de vazão de 2.271,8 m³/s e 66,3mm de volume, conforme Figura 68.

No trecho de rio R3, verifica-se na linha tracejada o hidrograma de entrada, resultado da convolução de J3, e a linha contínua em azul representando o hidrograma de saída, nota-se o amortecimento do hidrograma, resultando num pico de vazão de 2.101,4 m³/s e 64,85mm de volume, com translação do pico da onda em torno de 10 horas, conforme Figura 69.

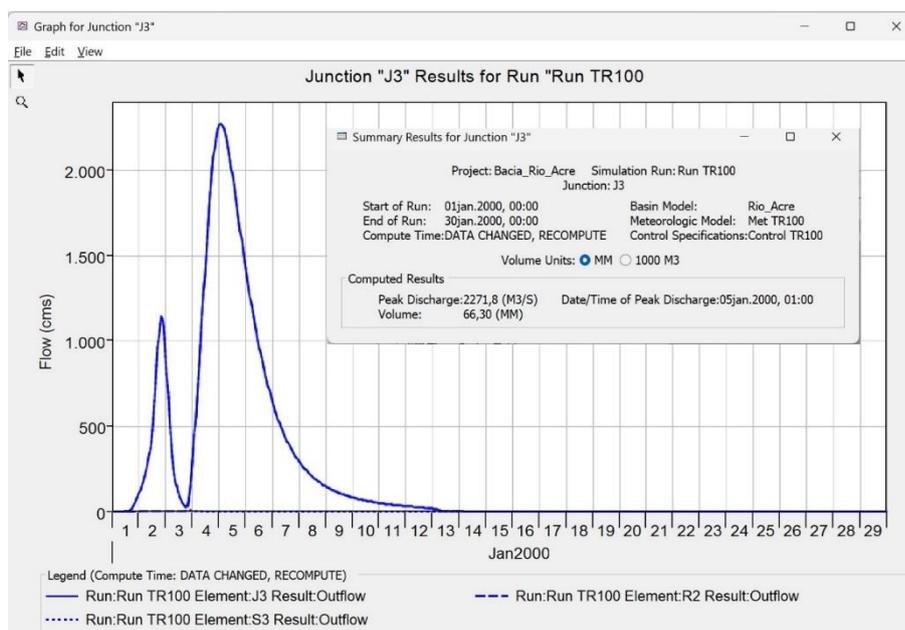


Figura 68: Hidrograma da junção J3

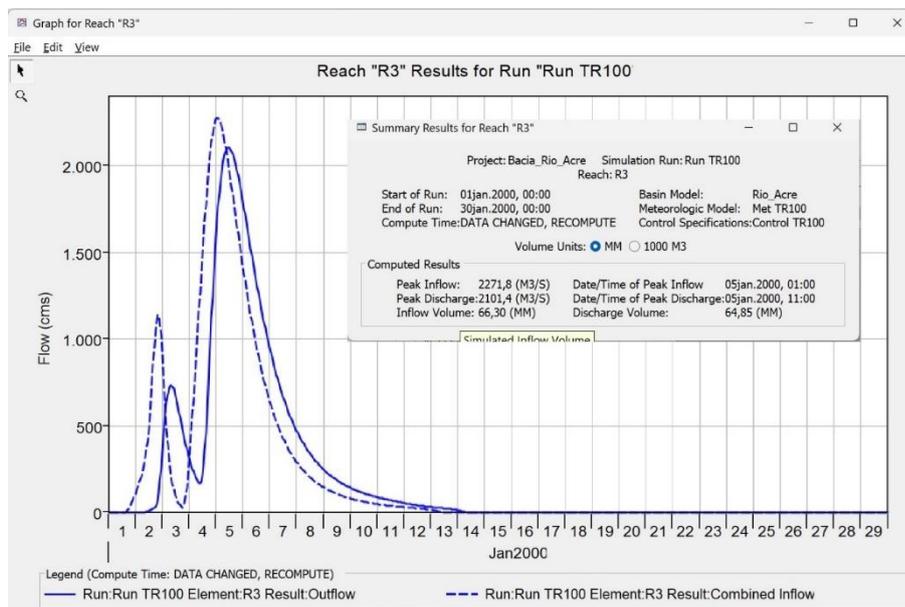


Figura 69: Hidrograma de entrada e saída do trecho de rio R3

Na sub-bacia S4, representado pela bacia do Rio Xapuri, verifica-se a cor vermelha no hietograma, uma perda de 71,09mm de volume, e em azul o volume excedente que virou escoamento é de 70,53mm, totalizando um volume precipitado no valor de 141,62mm, gerando um pico de vazão é de 2.604,7 m³/s, ou seja, tornando o Rio Xapuri um dos principais afluente em termos de vazão para o Rio Acre, conforme Figura 70.

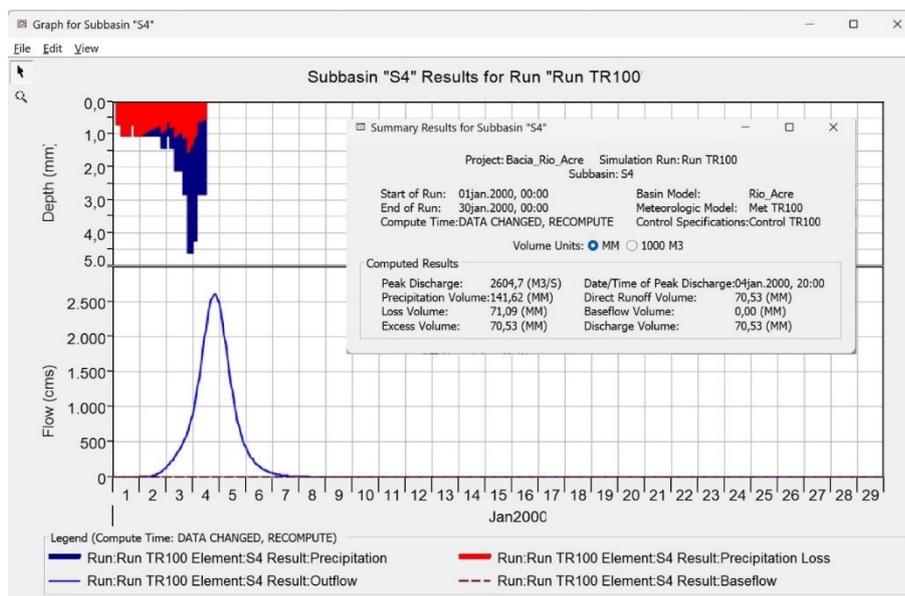


Figura 70: Hietograma e hidrograma da sub-bacia S4

Na sub-bacia S5, verifica-se a cor vermelha no hietograma, uma perda de 77,34mm de volume, e em azul o volume excedente que virou escoamento é de 107,1mm, totalizando um volume precipitado no valor de 184,44mm, gerando um pico de vazão é de 609,2 m³/s, uma das

menores vazões que as sub-bacias contribuem, se deve ao fato de ser também uma das menores áreas da bacia, conforme Figura 71.

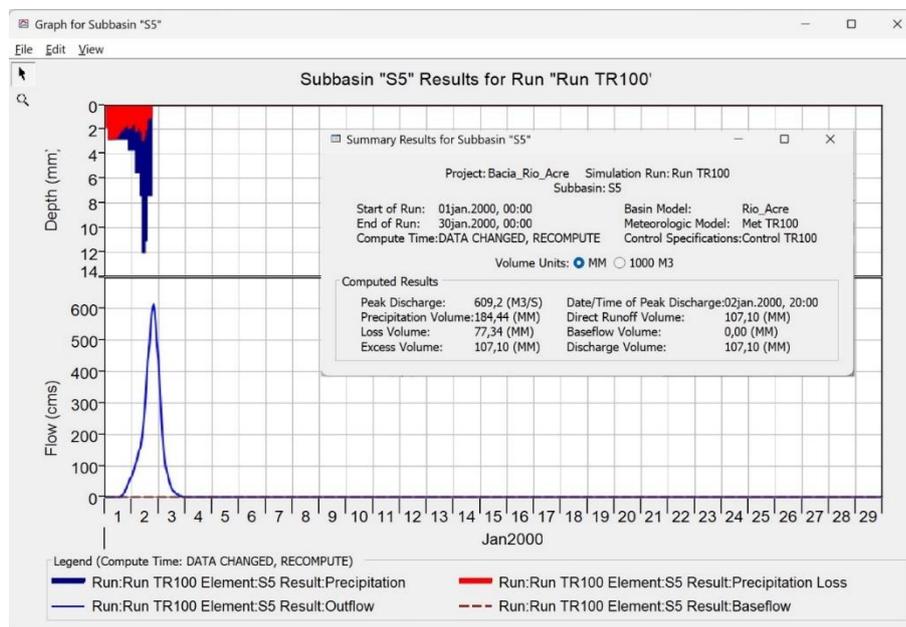


Figura 71: Hietograma e hidrograma da sub-bacia S5

Na junção J4, ocorre a convolução dos hidrograma resultantes das sub-bacias S4 representado em uma linha pontilhada, S5 representado por uma linha traço ponto e do trecho de rio R3 em uma linha tracejada, resultando num hidrograma com pico de vazão de 4.086,4 m³/s e 68,03mm de volume, conforme Figura 72. A junção J4 é importante para comparar as vazões observadas do posto fluviométrico 13550000, localizado em Xapuri.

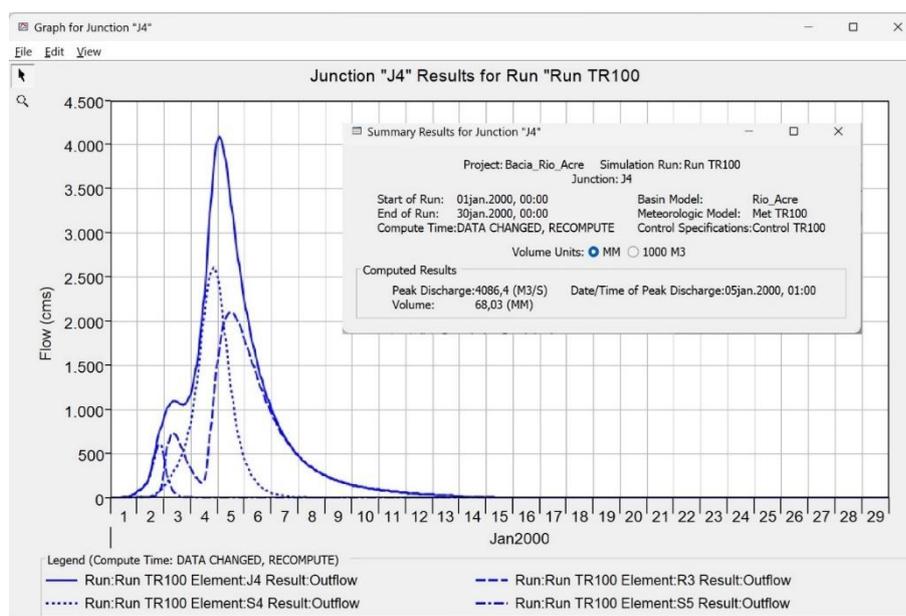


Figura 72: Hidrograma da junção J4

No trecho de rio R4, verifica-se na linha tracejada o hidrograma de entrada, resultado da convolução de J4, e a linha contínua em azul representando o hidrograma de saída, nota-se o amortecimento do hidrograma, resultando num pico de vazão de 2.764,2 m³/s e 64,05mm de volume, com translação do pico da onda em torno de 13 horas, conforme Figura 73. Percebe-se um amortecimento significativo, devido ao elevado índice de sinuosidade e baixa declividade do trecho do Rio Acre.

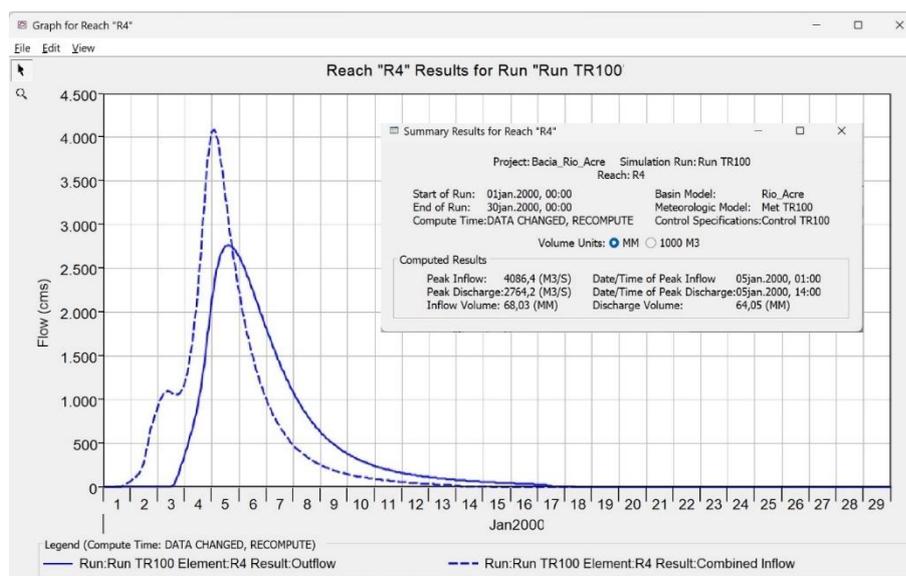


Figura 73: Hidrograma de entrada e saída do trecho de rio R4

Na sub-bacia S6, o hidrograma gerado revela uma perda de 77,08 mm de volume, representada em vermelho, o que corresponde à quantidade de precipitação que não contribuiu para o escoamento superficial, seja por infiltração ou outras formas de retenção. O volume excedente, que se converteu em escoamento efetivo, é de 109,91 mm, mostrado em azul, o que resulta em uma precipitação total de 186,99 mm. Esse volume precipitado foi suficiente para gerar um pico de vazão de 886,0 m³/s, conforme ilustrado na Figura 74. Esses dados destacam a importância de considerar tanto as perdas quanto o escoamento excedente na análise do comportamento hidrológico da sub-bacia, uma vez que influenciam diretamente o hidrograma e, conseqüentemente, a previsão de eventos de cheia.

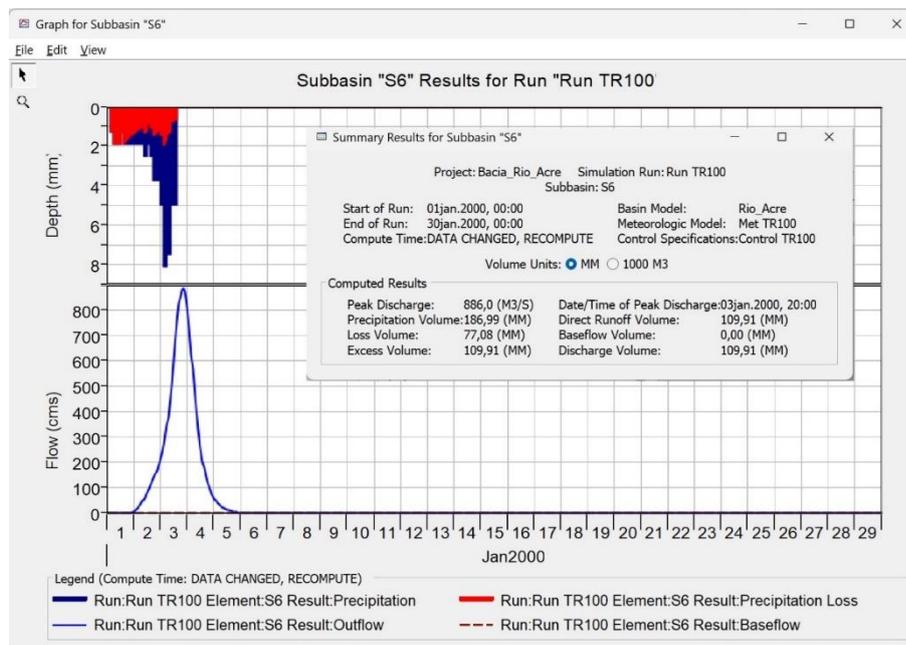


Figura 74: Hietograma e hidrograma da sub-bacia S6

Na junção J5, ocorre a convolução dos hidrograma resultantes da sub-bacia S6 representado em uma linha pontilhada e do trecho de rio R4 em uma linha tracejada, resultando num hidrograma com pico de vazão de 2.775,8 m³/s e 66,73mm de volume, conforme Figura 75. A sub-bacia S6 não contribui significativamente em termos de vazão na junção J5.

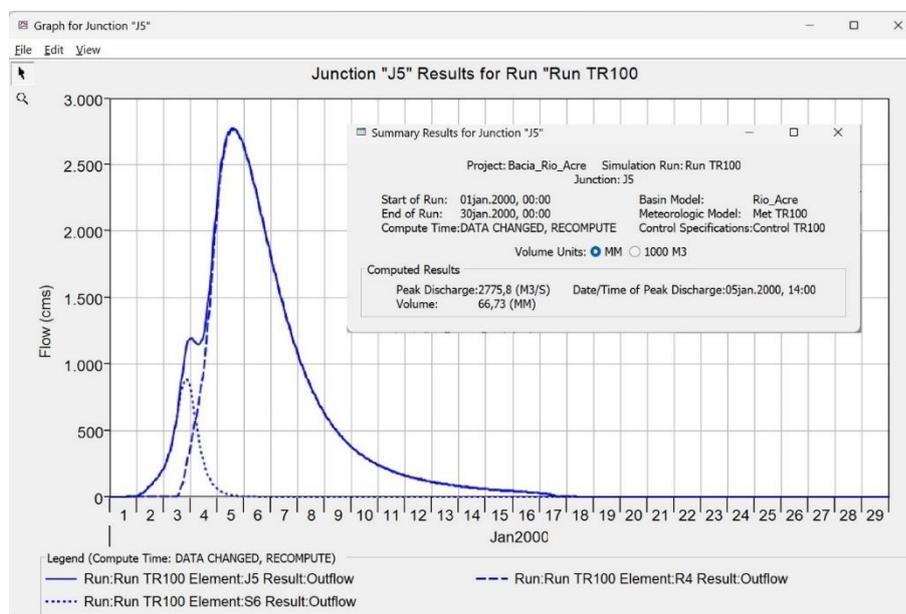


Figura 75: Hidrograma da junção J5

No trecho de rio R5, verifica-se na linha tracejada o hidrograma de entrada, resultado da convolução de J5, e a linha continua em azul representando o hidrograma de saída, nota-se o amortecimento do hidrograma, resultando num pico de vazão de 2.600,5 m³/s e 66,06mm de volume, com translação do pico da onda em torno de 13 horas, conforme Figura 76. Percebe-

se um amortecimento não é significativo, devido ao menor índice de sinuosidade e menor comprimento do trecho do Rio Acre.

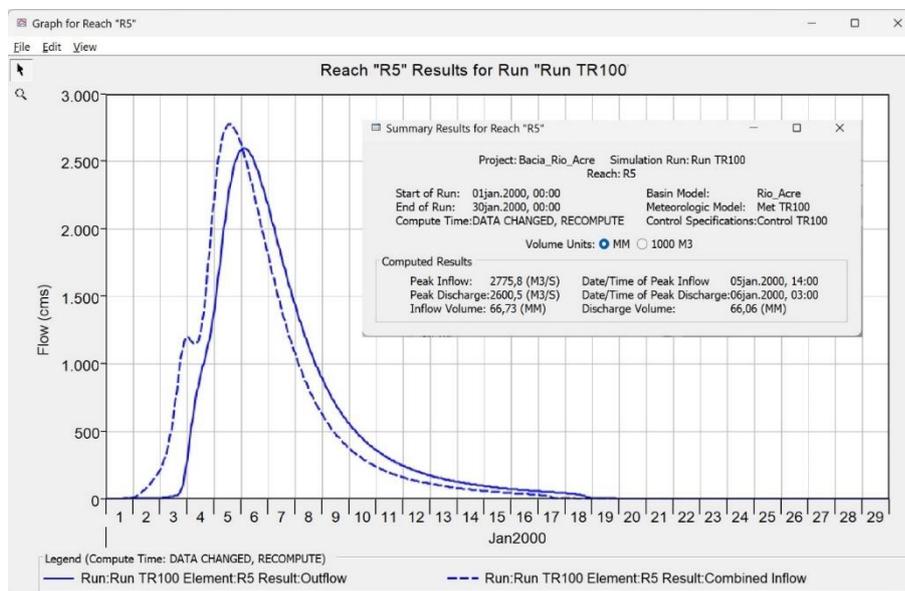


Figura 76: Hidrograma de entrada e saída do trecho de rio R5

Na sub-bacia S7, verifica-se a cor vermelha no hietograma, uma perda de 74,58mm de volume, e em azul o volume excedente que virou escoamento é de 101,41mm, totalizando um volume precipitado no valor de 175,99mm, gerando um pico de vazão é de 980,7 m³/s, conforme Figura 77.

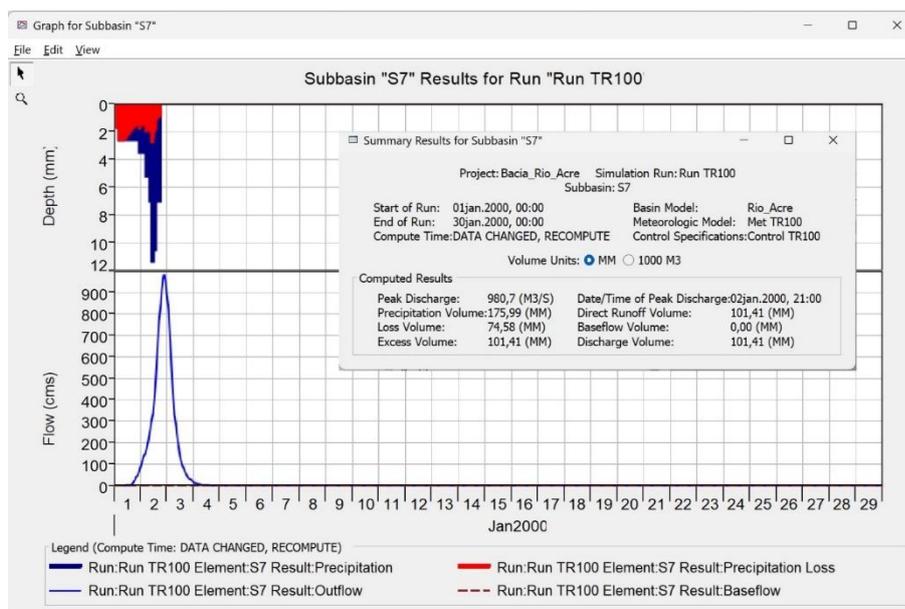


Figura 77: Hietograma e hidrograma da sub-bacia S7

Na junção J6, ocorre a convolução dos hidrograma resultantes da sub-bacia S7 e do trecho de rio R5, resultando num hidrograma com pico de vazão de 2.600,5 m³/s e 67,63mm de

volume, conforme Figura 78. No entanto devido aos picos de vazão da sub-bacia S7 e do trecho de rio R5 estarem em momentos distintos a sub-bacia S7 não impacta no pico de cheia do Rio Acre.

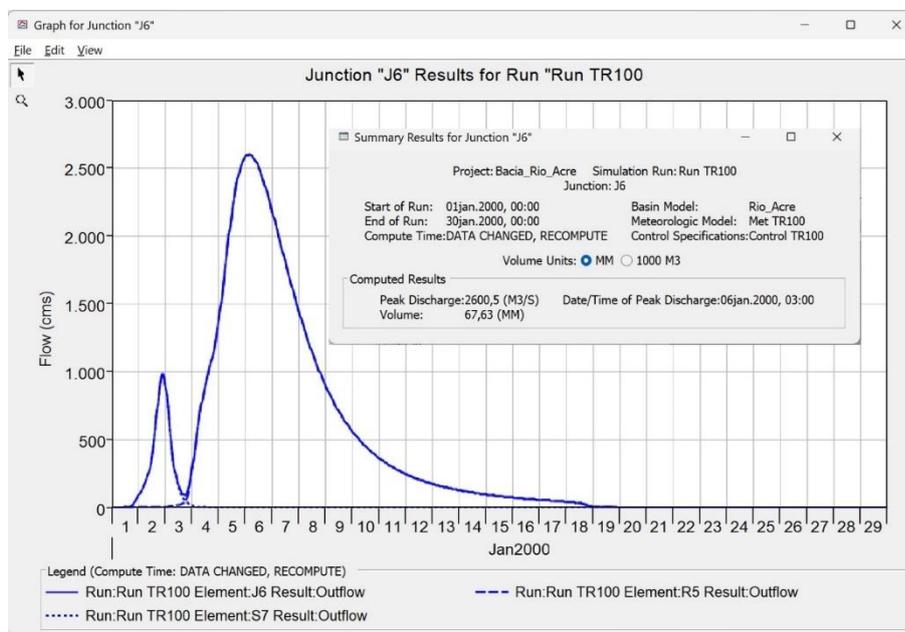


Figura 78: Hidrograma da junção J6

No trecho de rio R6, verifica-se na linha tracejada o hidrograma de entrada, resultado da convolução de J6, e a linha contínua em azul representando o hidrograma de saída, nota-se o amortecimento do hidrograma, resultando num pico de vazão de 2.342,1 m³/s e 65,99mm de volume, com translação do pico da onda em torno de 20 horas, conforme Figura 79.

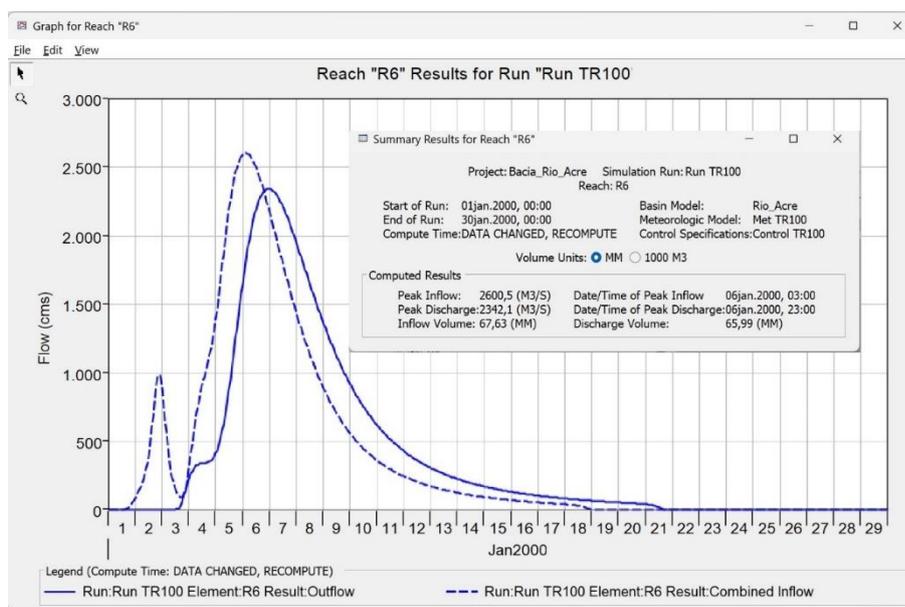


Figura 79: Hidrograma de entrada e saída do trecho de rio R6

Na sub-bacia S8, representado pela bacia do Rio Espalha, verifica-se a cor vermelha no hietograma, uma perda de 63,85mm de volume, e em azul o volume excedente que virou escoamento é de 51,39mm, totalizando um volume precipitado no valor de 115,24mm, gerando um pico de vazão é de 2.748,2 m³/s, ou seja, tornando o Rio Espalha o principal afluente em termos de vazão para o Rio Acre, conforme Figura 80.

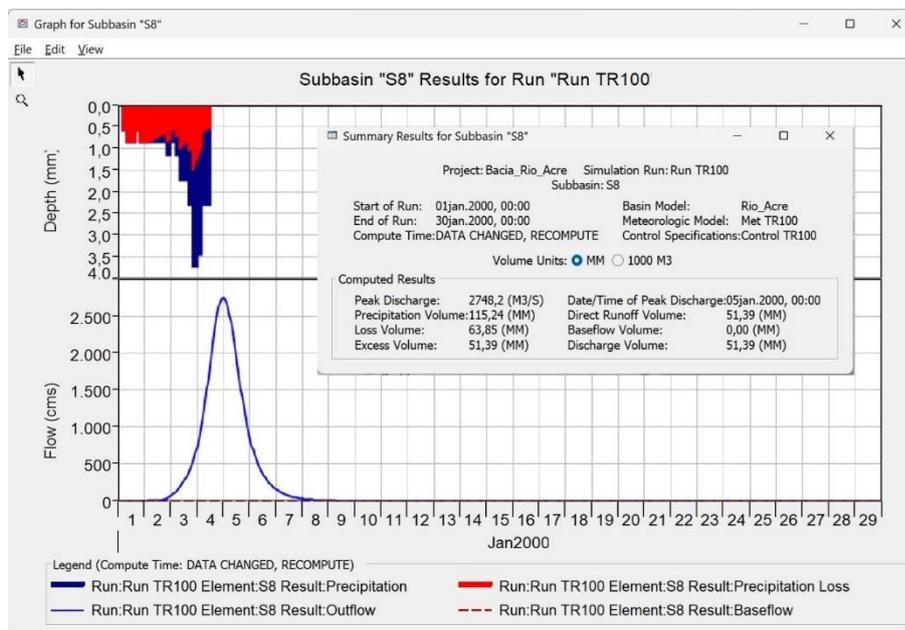


Figura 80: Hietograma e hidrograma da sub-bacia S8

Na sub-bacia S9, verifica-se a cor vermelha no hietograma, uma perda de 73,50mm de volume, e em azul o volume excedente que virou escoamento é de 109,05mm, totalizando um volume precipitado no valor de 182,55mm, gerando um pico de vazão é de 1.401 m³/s, conforme Figura 81.

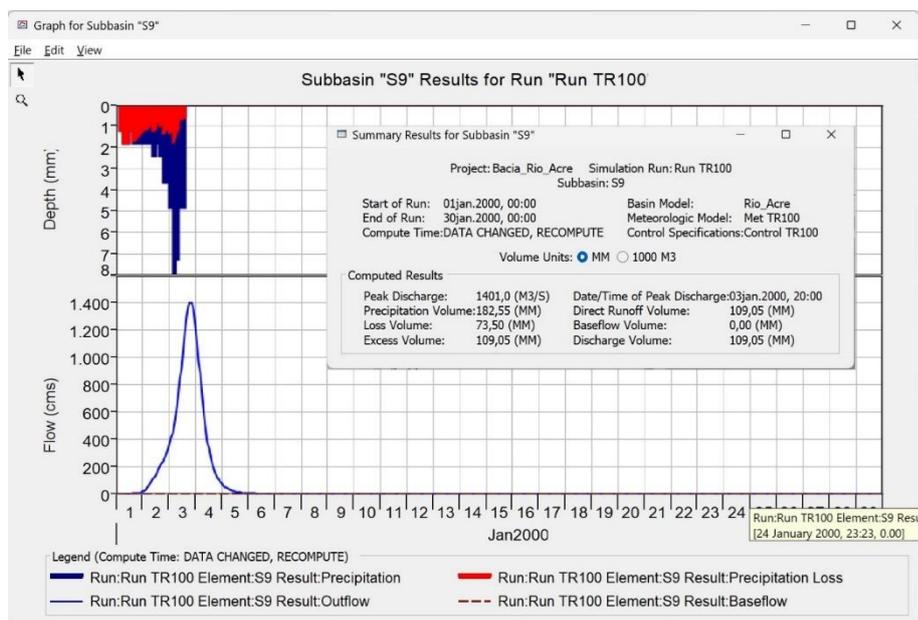


Figura 81: Hietograma e hidrograma da sub-bacia S9

Na junção J7, ocorre a convolução dos hidrograma resultantes das sub-bacias S8 representado em uma linha pontilhada, S9 representado por uma linha traço ponto e do trecho de rio R6 em uma linha tracejada, resultando num hidrograma com pico de vazão de 3.237,1 m³/s e 63,55mm de volume, conforme Figura 59. A junção J7 é importante para comparar as vazões observadas do posto fluviométrico 13600002, localizado em Rio Branco.

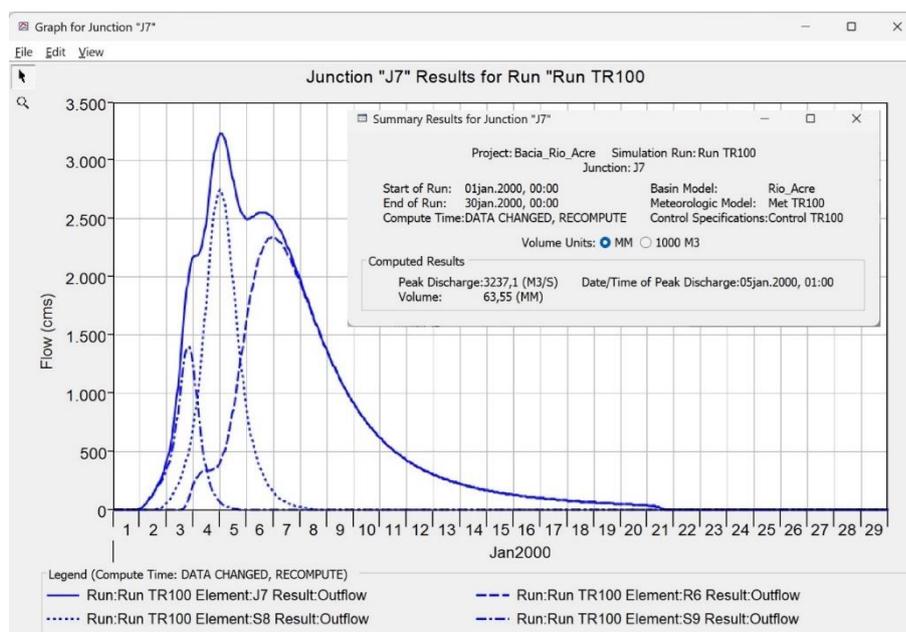


Figura 82: Hidrograma da junção J7

No trecho de rio R7, verifica-se na linha tracejada o hidrograma de entrada, resultado da convolução de J7, e a linha contínua em azul representando o hidrograma de saída, nota-se o amortecimento do hidrograma, resultando num pico de vazão de 2.338,7 m³/s e 58,7mm de volume, com translação do pico da onda em torno de 63 horas, conforme Figura 83. A maior translação na propagação de vazão ocorrer no trecho de rio R7, por apresentar o maior comprimento de trecho de rio entre Rio Branco e Porto Acre em aproximadamente 140km.

Conforme Duarte (2011), vazões superiores a 900 m³/s estão associadas a elevações do nível do rio acima de 13 metros, o que frequentemente resulta em enchentes severas na cidade de Rio Branco. Essas inundações impactam especialmente os bairros mais vulneráveis, onde as condições de moradia são precárias, e deixam entre 20 e 30 mil pessoas desabrigadas em situações recorrentes. Esses dados reforçam a importância de monitorar e prever com precisão as vazões fluviais, pois a ocorrência de picos acima desse limiar representa uma ameaça constante à segurança e bem-estar da população. A análise das vazões máximas torna-se, assim, fundamental para o planejamento de ações preventivas e de mitigação, especialmente em áreas densamente povoadas e com menor infraestrutura de defesa contra enchentes.

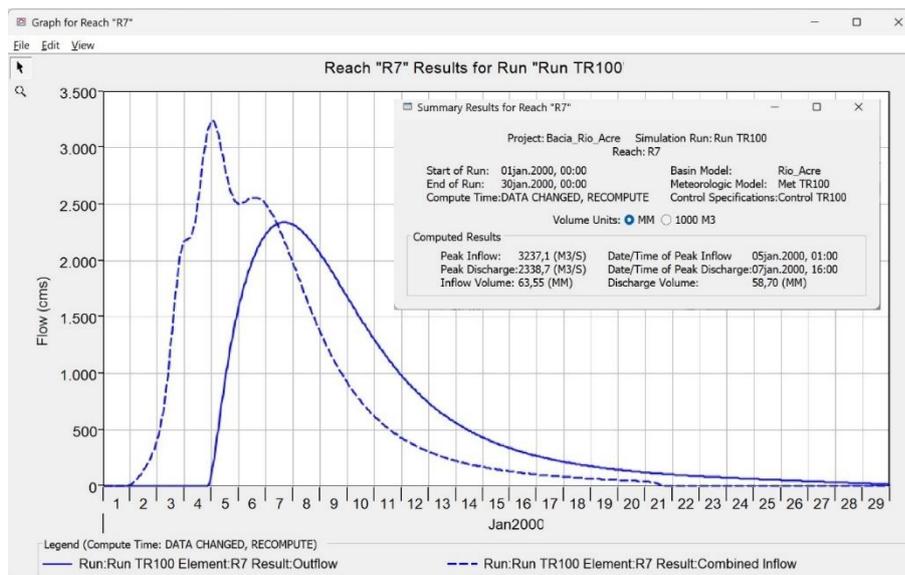


Figura 83: Hidrograma de entrada e saída do trecho de rio R7

Na sub-bacia S10, importante pois nele está situado a cidade de Rio Branco, verifica-se a cor vermelha no hietograma, uma perda de 66,14mm de volume, e em azul o volume excedente que virou escoamento é de 92,94mm, totalizando um volume precipitado no valor de 159,08mm, gerando um pico de vazão é de 2088,8 m³/s, conforme Figura 84. A sub-bacia S10 torna-se importante pela elevada urbanização, confirmado por apresentar o maior CN entre as sub-bacias, e apresenta dois importantes afluentes o Igarapé São Francisco e o Igarapé Redenção.

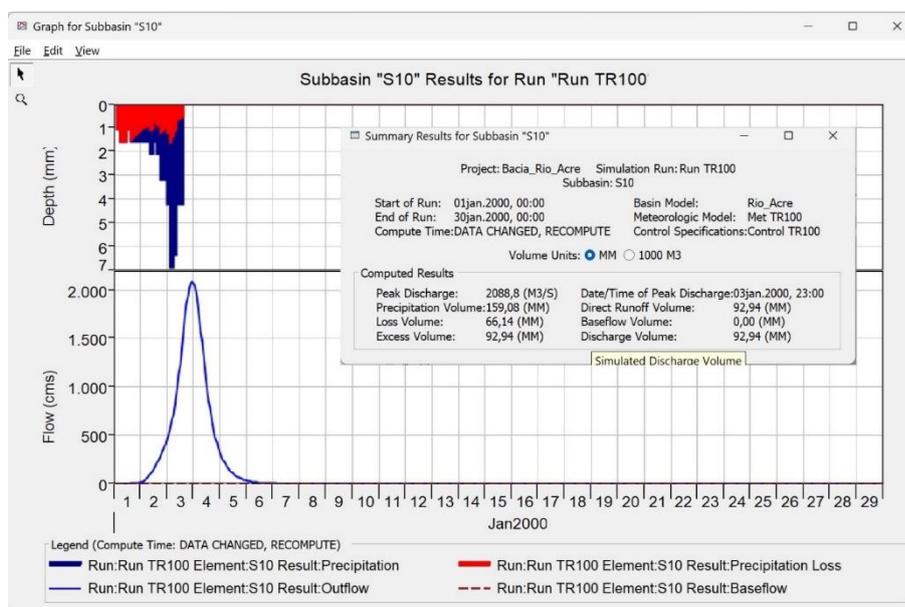


Figura 84: Hietograma e hidrograma da sub-bacia S10

Na junção J8, ocorre a convolução dos hidrograma resultantes da sub-bacia S10 representado em uma linha pontilhada e do trecho de rio R7 em uma linha tracejada, resultando

num hidrograma com pico de vazão de 2.338,7 m³/s e 62,02mm de volume, conforme Figura 85.

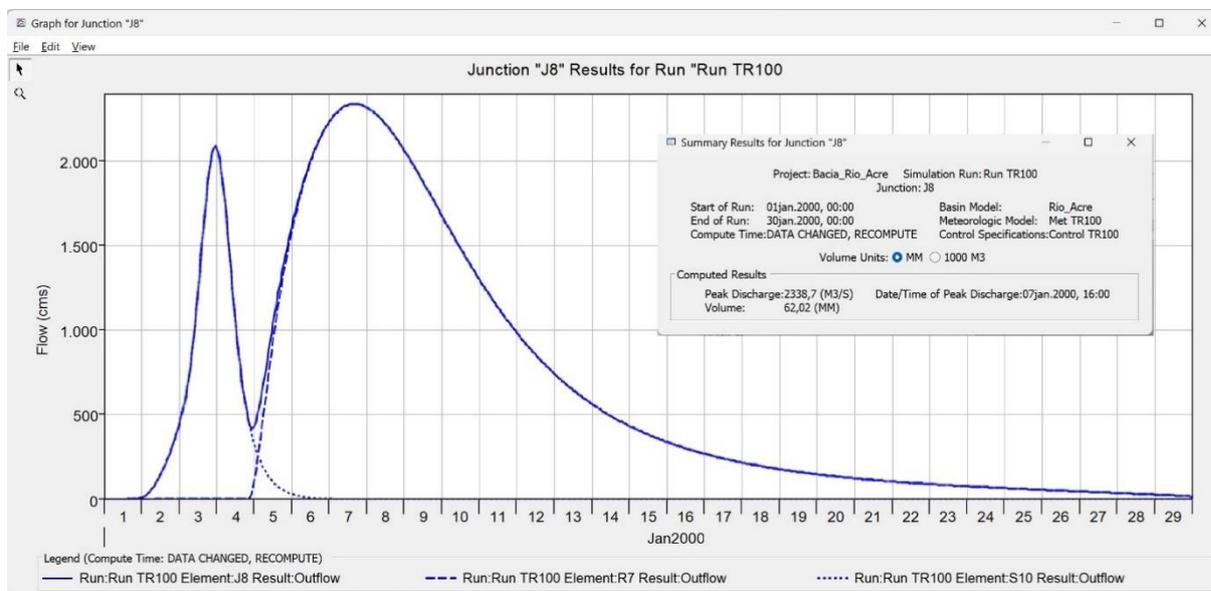


Figura 85: Hidrograma da junção J8

No trecho de rio R8, verifica-se na linha tracejada o hidrograma de entrada, resultado da convolução de J8, e a linha contínua em azul representando o hidrograma de saída, nota-se o amortecimento do hidrograma, resultando num pico de vazão de 2195,6m³/s e 59,64mm de volume, com translação do pico da onda em torno de 28 horas, conforme Figura 86.

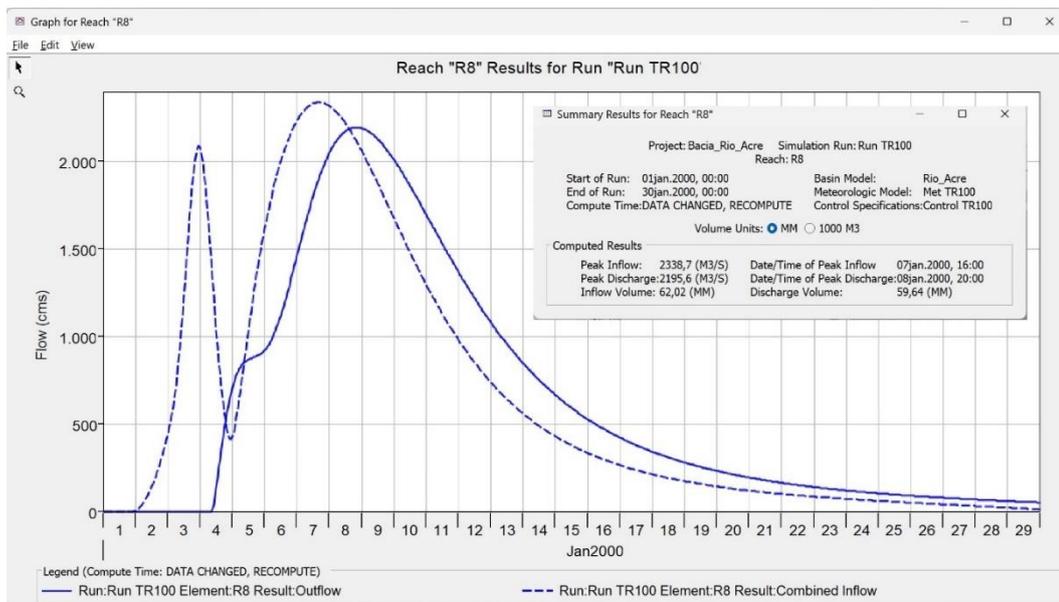


Figura 86: Hidrograma de entrada e saída do trecho de rio R8

Na sub-bacia S11, representado pela bacia do Riozinho do Andirá, verifica-se a cor vermelha no hidrograma, uma perda de 64,64mm de volume, e em azul o volume excedente que virou escoamento é de 79,36mm, totalizando um volume precipitado no valor de 144mm,

gerando um pico de vazão é de 2.572,0 m³/s, ou seja, tornando o Riozinho do Andirá um dos principais afluentes em termos de vazão para o Rio Acre, conforme Figura 87.

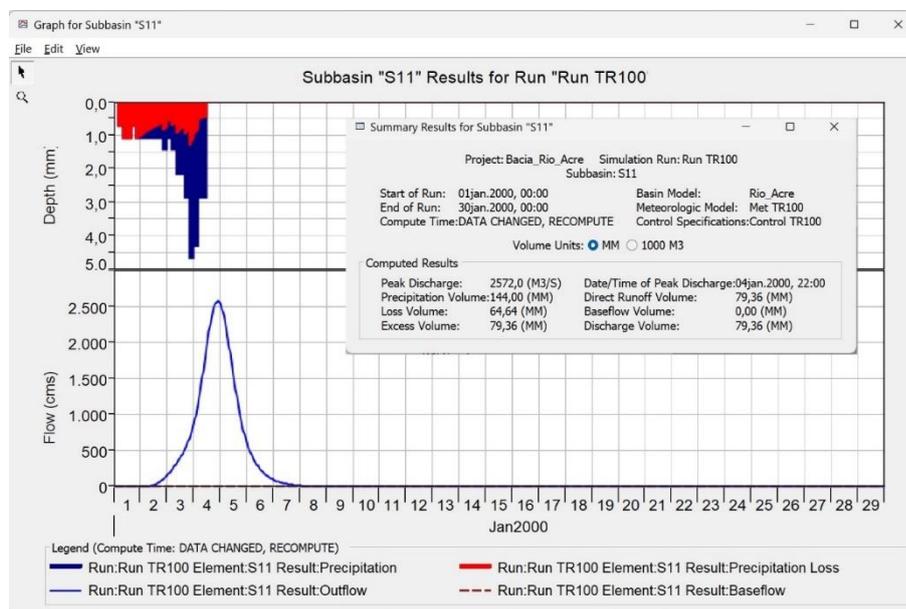


Figura 87: Hietograma e hidrograma da sub-bacia S11

Na sub-bacia S12, representado pela bacia do Rio Antimari, verifica-se a cor vermelha no hietograma, uma perda de 67,28mm de volume, e em azul o volume excedente que virou escoamento é de 81,48mm, totalizando um volume precipitado no valor de 148,76mm, gerando um pico de vazão é de 2.231,4 m³/s, ou seja, tornando o Rio Antimari um dos principais afluentes em termos de vazão para o Rio Acre, conforme Figura 88.

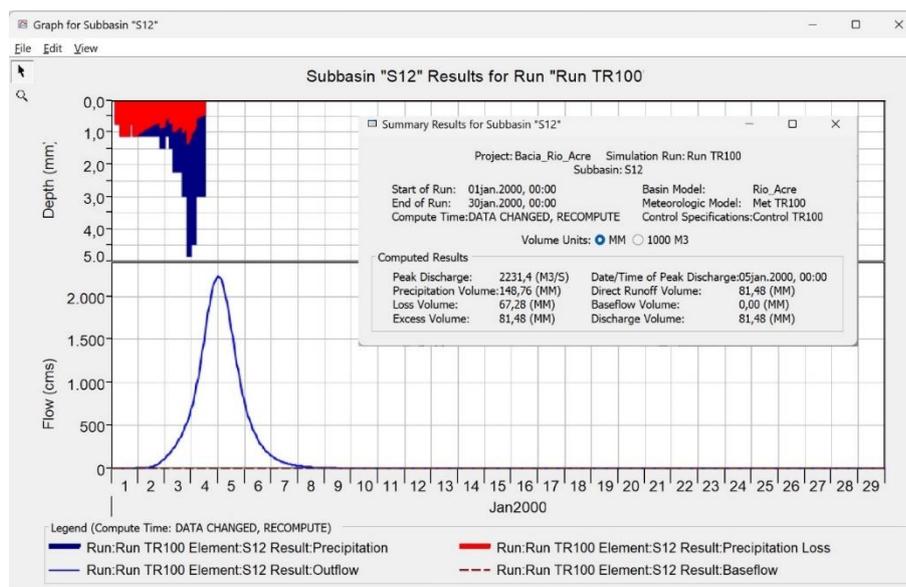


Figura 88: Hietograma e hidrograma da sub-bacia S12

Na junção J9, ocorre a convolução dos hidrograma resultantes das sub-bacias S11 representado em uma linha pontilhada, S12 representado por uma linha traço ponto e do trecho

de rio R8 em uma linha tracejada, resultando num hidrograma com pico de vazão de 5.487,8 m³/s e 64,89mm de volume, conforme Figura 89. A junção J9 é importante para comparar as vazões observadas do posto fluviométrico 13650000, localizado em Floriano Peixoto no Estado de Amazonas.

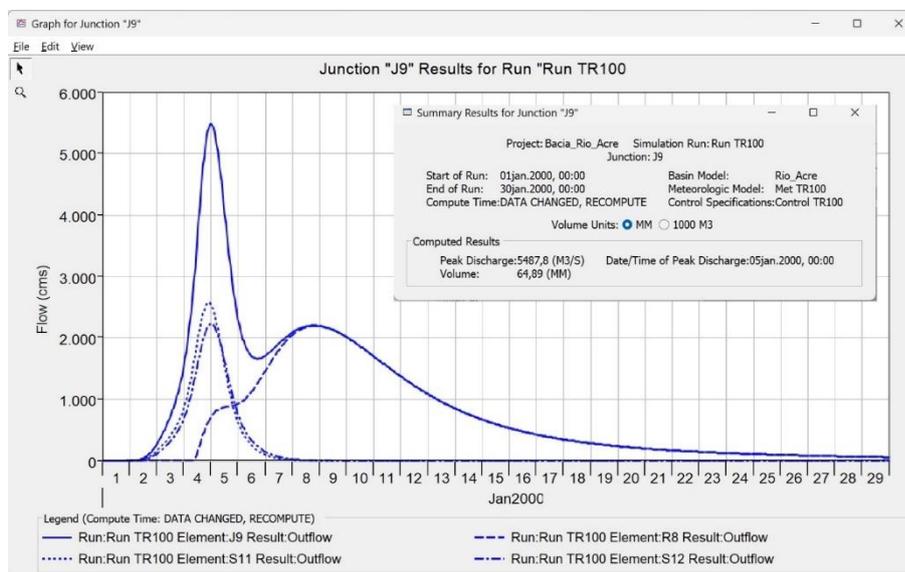


Figura 89: Hidrograma da junção J9

No trecho de rio R9, verifica-se na linha tracejada o hidrograma de entrada, resultado da convolução de J9, e a linha contínua em azul representando o hidrograma de saída, nota-se o amortecimento do hidrograma, resultando num pico de vazão de 3.237,9m³/s e 61,80mm de volume, com translação do pico da onda em torno de 10 horas, conforme Figura 90. Este é o trecho do rio que mais amortece o hidrograma, isto se deve ao elevado índice de sinuosidade do trecho e pela menor declividade apresentada entre os trechos do Rio Acre.

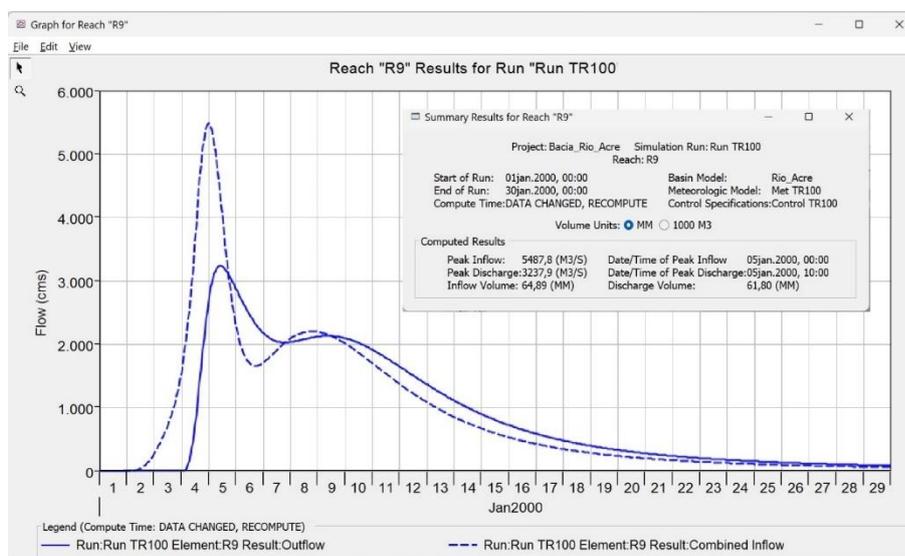


Figura 90: Hidrograma de entrada e saída do trecho de rio R9

Na sub-bacia S9, verifica-se a cor vermelha no hietograma, uma perda de 69,40mm de volume, e em azul o volume excedente que virou escoamento é de 96,94mm, totalizando um volume precipitado no valor de 166,34mm, gerando um pico de vazão é de 1.503,8 m³/s, conforme Figura 91.

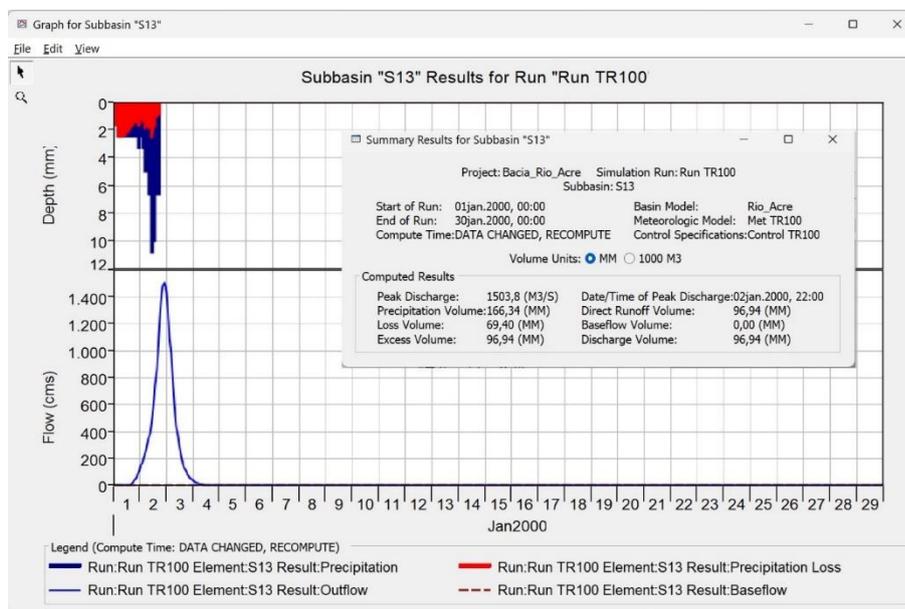


Figura 91: Hietograma e hidrograma da sub-bacia S13

Para finalizar todo o percurso do Rio Acre, no exutório Sink-1, ocorre a convolução dos hidrograma resultantes da sub-bacia S13 representado em uma linha pontilhada e do trecho de rio R9 em uma linha tracejada, resultando num hidrograma com pico de vazão de 3.237,9 m³/s e 62,86mm de volume, conforme Figura 92.

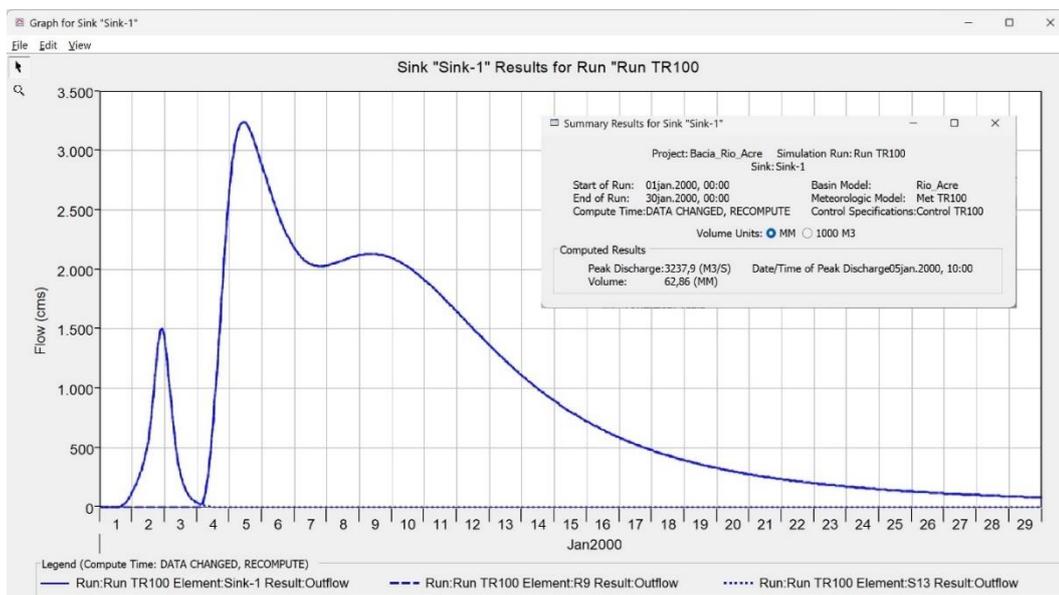


Figura 92: Hidrograma no exutório

De acordo com Sant'anna (2017) e Duarte (2011), o exutório da Bacia do Rio Acre ocorre na cidade de Boca do Acre (AM), sendo o ponto onde o rio Acre deságua na margem direita do rio Purus. O trecho do rio Acre que se estende de Rio Branco até Boca do Acre, com uma extensão de 311 km, é considerado navegável. No entanto, apresenta uma profundidade média de apenas 0,8 metros ao longo da maior parte do percurso.

Na Tabela 10, é associado o elemento hidrológico aos municípios que estão localizados, afim de apresentar as vazões máximas estimadas através da simulação no HEC-HMS, os hietogramas e hidrograma apresentados anteriormente foram determinados com base no tempo de retorno de 100 anos, no entanto, o resumo da simulação hidrológica para os demais tempos de retorno encontram no Apêndice E.

Tabela 10: Vazões máximas das cidades do Rio Acre

Município	Elemento Hidrológico	TR ₁₀₀	TR ₅₀	TR ₂₅	TR ₅
Assis Brasil	J1	2.682,6	2.376,5	2.071,4	1.384,1
Brasiléia	J2	3.031,4	2.621,0	2.313,3	1.470,7
Xapuri	J4	4.086,4	3.278,6	2.666,1	1.300,7
Capixaba	J6	2.600,5	2.134,7	1.800,5	954,8
Rio Branco	J7	3.237,1	2.819,5	2.325,3	1.407,3
Porto Acre	J8	2.338,7	1.909,0	1.580,9	1.016,8
Florianópolis	J9	5.487,8	4.807,4	3.963,4	2.373,4

No Gráfico 15, apresenta-se a estimativa das vazões máximas simuladas para os tempos de retorno de 5 (amarelo), 25 (cinza), 50 (laranja) e 100 (azul) anos, dispostas para cada município da Bacia do Rio Acre, graficamente percebe-se o aumento da vazão de Assis Brasil passando por Brasiléia até Xapuri, isto se deve as elevadas declividades, que fazem os hidrograma rapidamente convolucionar, apesar do amortecimento na propagação de vazões.

Entre a cidade de Xapuri e o trecho que passa por Capixaba até Rio Branco, observa-se um claro amortecimento do hidrograma, especialmente na região de Capixaba. Esse efeito se deve, em grande parte, às baixas declividades tanto das sub-bacias quanto dos trechos de rio nessa área, além do elevado índice de sinuosidade do Rio Acre. A configuração topográfica, caracterizada por altitudes baixas no lado sul da bacia, também contribui para esse processo de amortecimento. Como resultado, os picos de cheia são significativamente reduzidos ao longo desse percurso, o que ajuda a minimizar os impactos de inundações mais severas nas áreas ribeirinhas dessas localidades. Esse fenômeno natural de controle das vazões pode ser considerando uma camada adicional de proteção para as áreas urbanas ao longo do rio.

Por outro lado, entre a cidade de Rio Branco e Porto Acre, ocorre um amortecimento natural ao longo da extensão do Rio Acre, mas a situação muda na cidade de Floriano Peixoto. Nesse ponto, o rio recebe contribuições significativas de dois afluentes: os rios Antimari e Riozinho Andirá. Esses afluentes têm um impacto direto na elevação do hidrograma, aumentando o volume de água e, conseqüentemente, as vazões estimadas nessa região.

Devido a essa confluência, Floriano Peixoto apresenta algumas das maiores vazões observadas entre as cidades banhadas pelo Rio Acre, o que ressalta a importância de um monitoramento constante dessas áreas para prever e mitigar possíveis eventos de cheia. A interação entre os afluentes e o rio principal é um fator crucial na dinâmica hidrológica da bacia, influenciando diretamente a resposta do sistema fluvial em períodos de precipitação intensa.

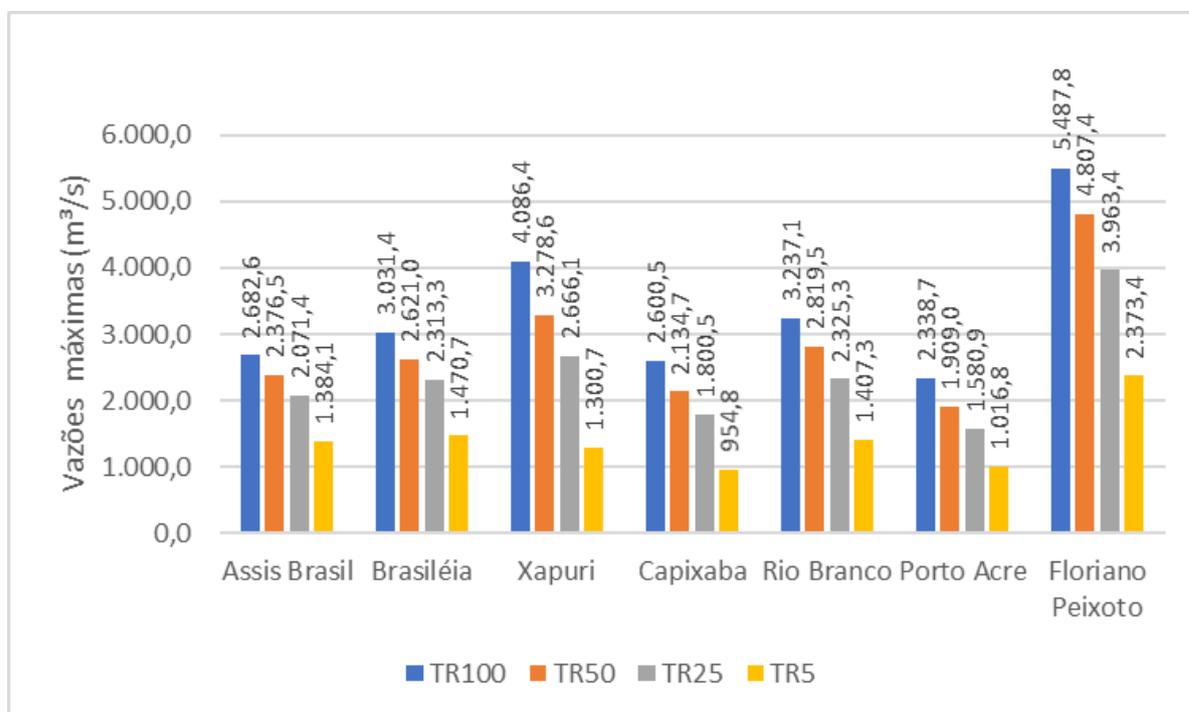


Gráfico 15: Vazões máximas das cidades do Rio Acre

5.5 Vazões máximas com base nas distribuições teóricas

Com base nas vazões observadas para a estação fluviométrica 13450000, localizada na cidade de Assis Brasil, encontrados 39 registros, desta forma, através do método empírico, verifica-se que a maior vazão observada possui tempo de retorno de 40 anos, resultado que é uma limitação deste tipo método, conforme Gráfico 16. Logo, com base nas distribuições teóricas verifica-se que, a distribuição Log-Person tipo III subestima os valores encontrado, porém a distribuição Log-Normal caracteriza melhor o conjunto de amostras.

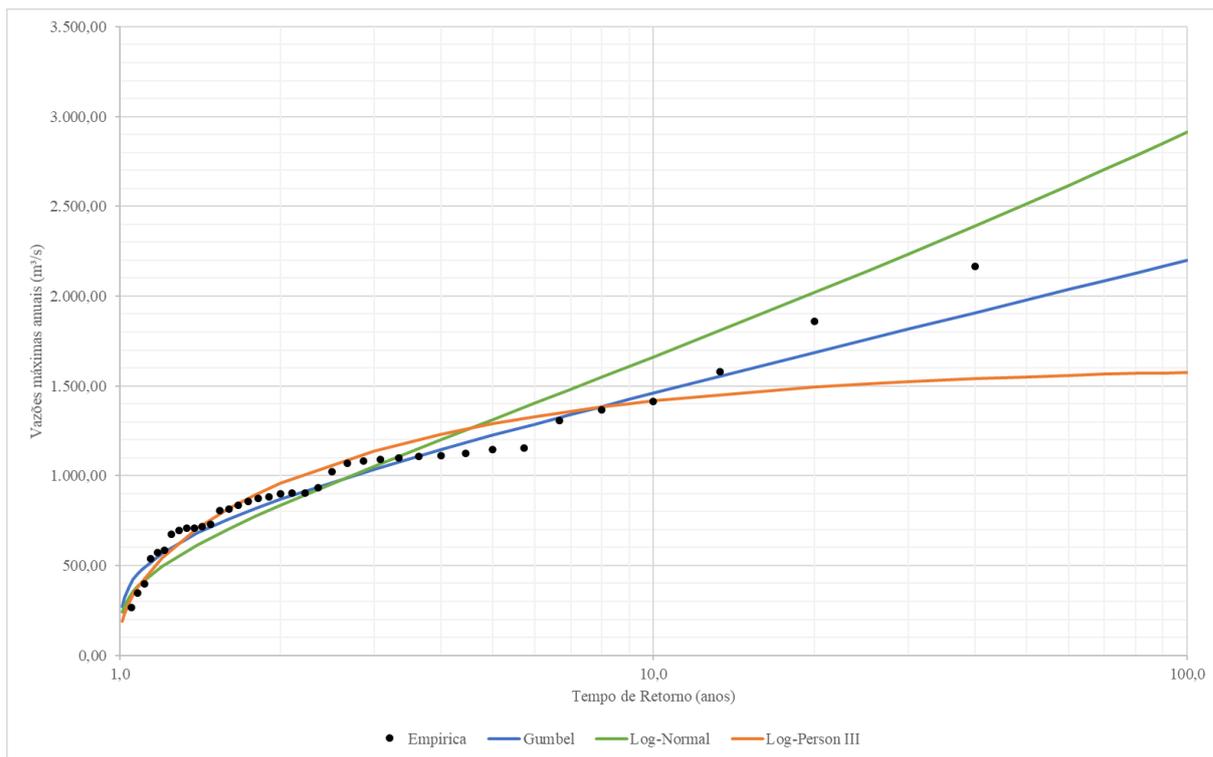


Gráfico 16: Distribuição das vazões máximas da estação fluviométrica de Assis Brasil (13450000)

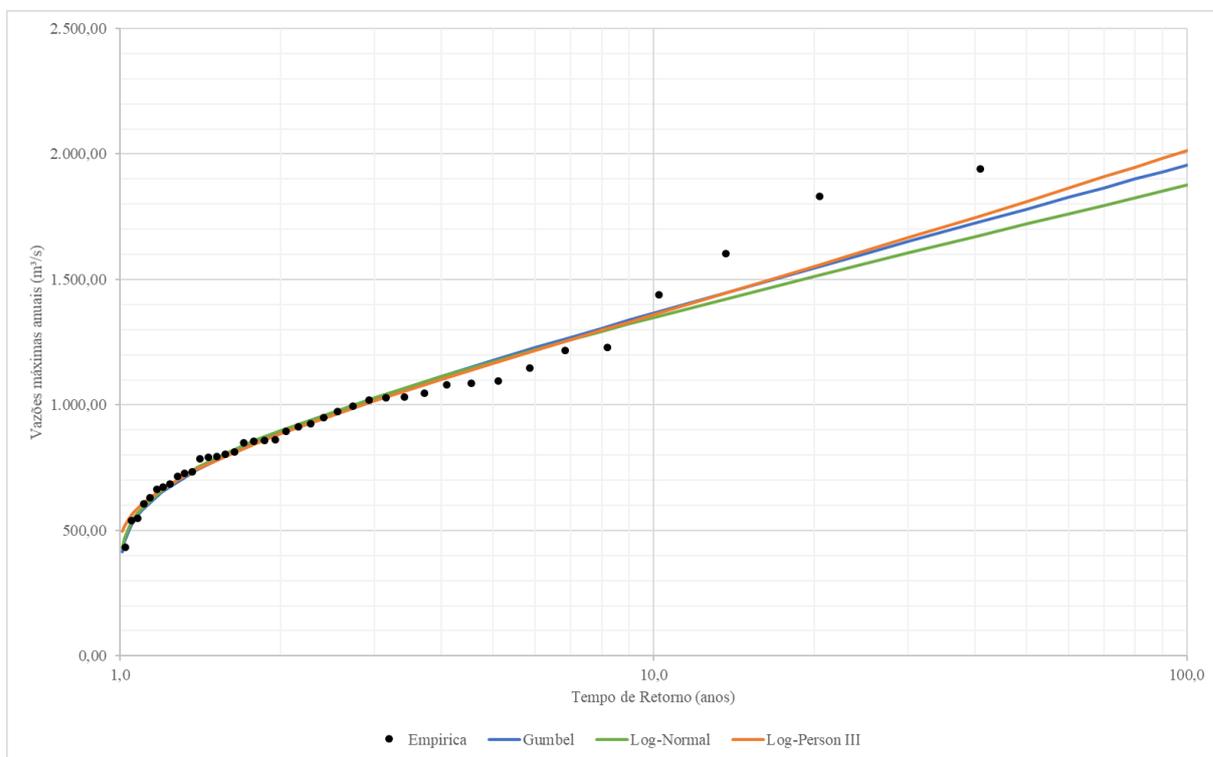


Gráfico 17: Distribuição das vazões máximas da estação fluviométrica de Brasília (13470000)

No Gráfico 17, as vazões observadas para a estação fluviométrica 13470000, localizada na cidade de Brasília, foram utilizados 39 registros, desta forma, através do método empírico, verifica-se que a maior vazão observada possui tempo de retorno de 41 anos. No entanto, com

base nas distribuições teóricas verifica-se que, a distribuição Log-Person tipo III caracteriza melhor o conjunto de amostras, porém a distribuição de Gumbel e Log-Normal, apresentam valores semelhantes.

No Gráfico 18, as vazões observadas para a estação fluviométrica 13550000, localizada na cidade de Xapuri, foram utilizados 56 registros, desta forma, através do método empírico, verifica-se que a maior vazão observada possui tempo de retorno de 57 anos. No entanto, com base nas distribuições teóricas verifica-se que, a distribuição Log-Normal caracteriza melhor o conjunto de amostras, logo em seguida a distribuição de Gumbel e posteriormente a distribuição Log-Person tipo III.

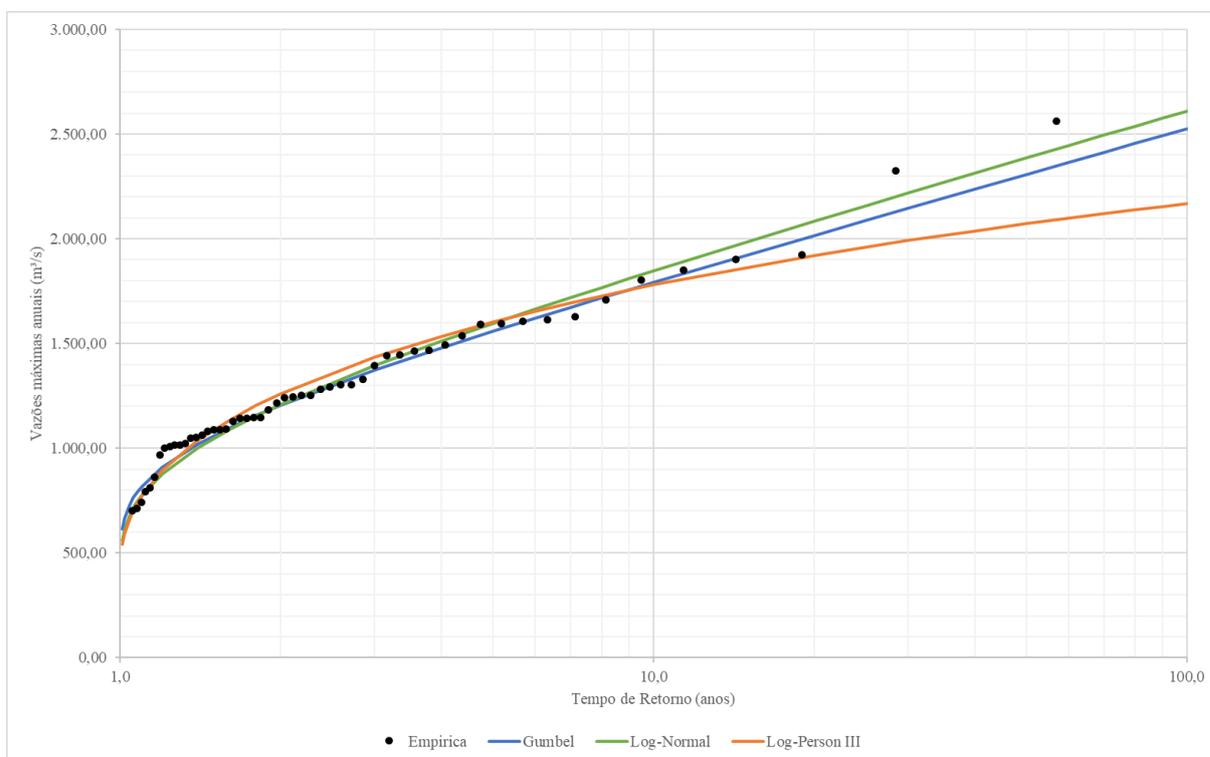


Gráfico 18: Distribuição das vazões máximas da estação fluviométrica de Xapuri (13550000)

No Gráfico 19, as vazões observadas para a estação fluviométrica 13600002, localizada na cidade de Rio Branco, foram utilizados 56 registros, desta forma, através do método empírico, verifica-se que a maior vazão observada possui tempo de retorno de 57 anos. No entanto, com base nas distribuições teóricas verifica-se que, a distribuição Log-Person tipo III caracteriza melhor o conjunto de amostras, porém a distribuição de Gumbel e Log-Normal, apresentam valores semelhantes.

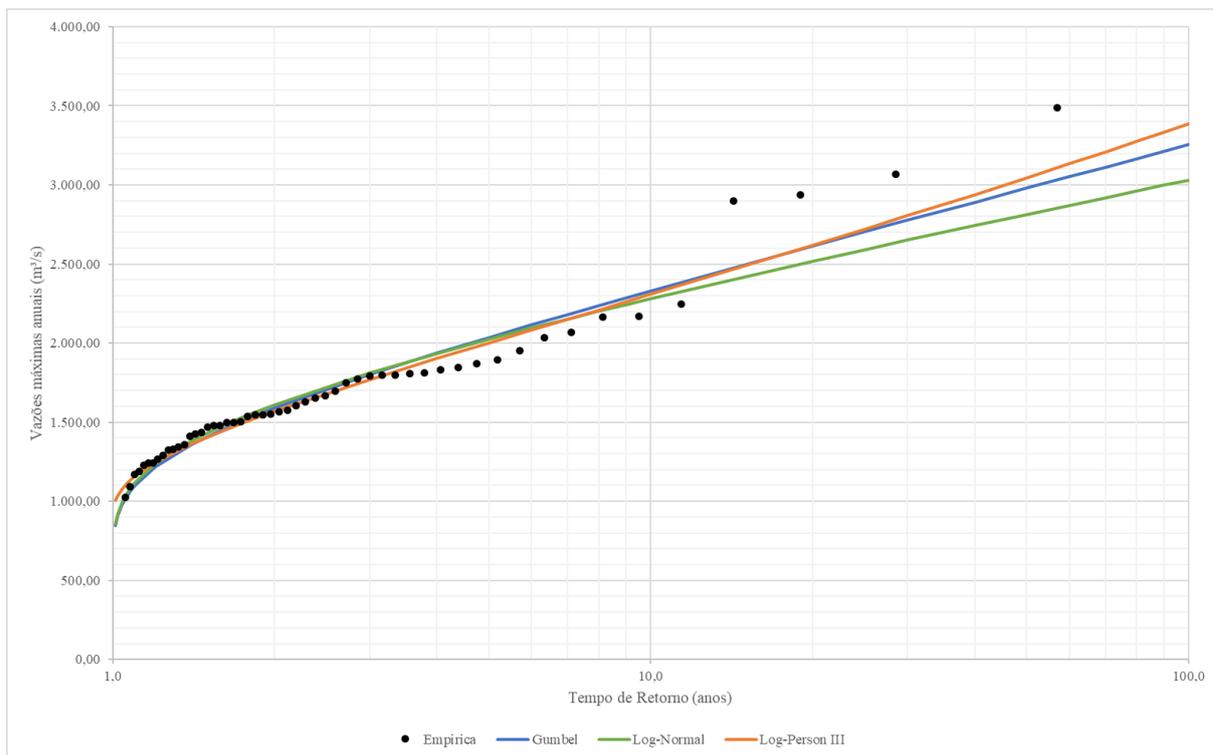


Gráfico 19: Distribuição das vazões máximas da estação fluviométrica de Rio Branco (13600002)

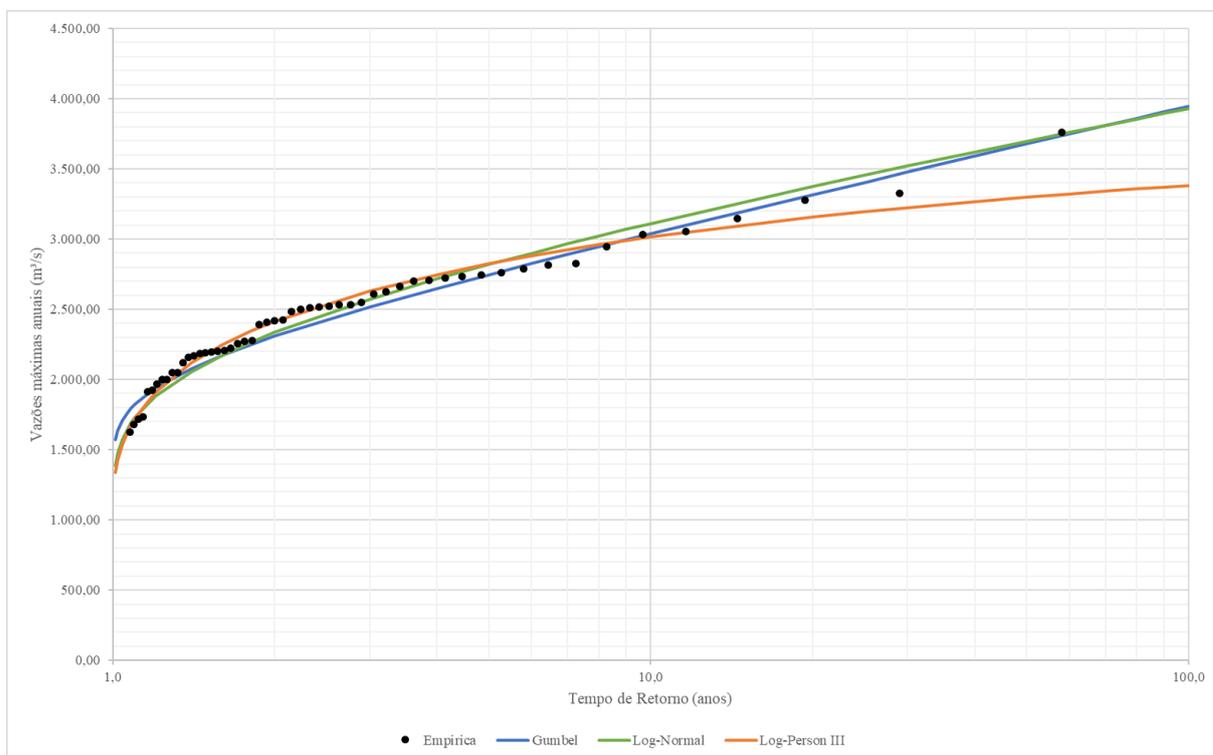


Gráfico 20: Distribuição das vazões máximas da estação fluviométrica de Floriano Peixoto (13650000)

No Gráfico 20, as vazões observadas para a estação fluviométrica 13650000, localizada na cidade de Floriano Peixoto, foram utilizados 57 registros, desta forma, através do método empírico, verifica-se que a maior vazão observada possui tempo de retorno de 58 anos. No

entanto, com base nas distribuições teóricas verifica-se que, a distribuição Log-Normal caracteriza melhor o conjunto de amostras, representando melhor os dados iniciais e conservador em tempos de retornos superiores a 100 anos, porém a distribuição de Gumbel apresenta valores semelhantes, no entanto, a distribuição Log-Person tipo II subestima os valores encontrado.

Os cálculos e dados utilizados nas distribuições teóricas para elaborar os gráficos apresentados encontram-se no Apêndice F.

As vazões encontradas com base nas distribuições para cada estação fluviométrica, juntamente com as vazões simulada pelo HEC-HMS, para o tempo de retorno de 100 anos, a vazão de Assis Brasil encontra-se coerente com a distribuição Log-Normal, no entanto para os municípios de Brasília, Xapuri e Floriano Peixoto são maiores que as calculadas com base nas distribuições, porém para a cidade de Rio Branco apresentado a menor variabilidade dos resultados, conforme Tabela 11.

Tabela 11: Vazões máximas com base nas distribuições para o TR = 100 anos

Município	Estação	Gumbel	Log-Normal	Log-Person III	HEC-HMS
Assis Brasil	13450000	2.198,51	2.911,70	1.574,84	2.682,60
Brasília	13470000	1.956,06	1.875,31	2.014,08	3.031,40
Xapuri	13550000	2.524,34	2.610,39	2.166,35	4.086,40
Rio Branco	13600002	3.254,21	3.030,18	3.387,22	3.237,10
Floriano Peixoto	13650000	3.947,48	3.929,73	3.381,17	5.487,80

As vazões encontradas com base nas distribuições para cada estação fluviométrica, juntamente com as vazões simulada pelo HEC-HMS, para o tempo de retorno de 50 anos, apresentam a mesmas semelhanças que os valores encontrados para o tempo de retorno de 100 anos, porém com uma menor variação dos resultados, conforme Tabela 12.

Tabela 12: Vazões máximas com base nas distribuições para o TR = 50 anos

Município	Estação	Gumbel	Log-Normal	Log-Person III	HEC-HMS
Assis Brasil	13450000	1.979,07	2.515,25	1.551,31	2.376,50
Brasília	13470000	1.780,61	1.720,46	1.811,14	2.621,00
Xapuri	13550000	2.306,80	2.385,13	2.071,94	3.278,60
Rio Branco	13600002	2.979,83	2.813,86	3.045,59	2.819,50
Floriano Peixoto	13650000	3.677,06	3.697,13	3.297,82	4.807,40

As vazões encontradas com base nas distribuições para cada estação fluviométrica, juntamente com as vazões simulada pelo HEC-HMS, para o tempo de retorno de 25 anos, a vazão de Assis Brasil encontra-se coerente com a distribuição Log-Normal, no entanto para os municípios de Brasília e Xapuri são maiores que as calculadas com base nas distribuições, já

para a cidade de Rio Branco a vazão simulada é a menor, e para o município de Floriano Peixoto, apesar da vazão ser superior vem apresentando uma menor variabilidade dos resultados em relação aos tempos de retorno de 50 e 100 anos, conforme Tabela 13.

Tabela 13: Vazões máximas com base nas distribuições para o TR = 25 anos

Município	Estação	Gumbel	Log-Normal	Log-Person III	HEC-HMS
Assis Brasil	13450000	1.757,99	2.137,53	1.511,42	2.071,40
Brasiléia	13470000	1.603,86	1.563,26	1.614,45	2.313,30
Xapuri	13550000	2.087,64	2.157,44	1.961,27	2.666,10
Rio Branco	13600002	2.703,41	2.591,45	2.720,41	2.325,30
Floriano Peixoto	13650000	3.404,63	3.454,67	3.194,83	3.963,40

As vazões encontradas com base nas distribuições para cada estação fluviométrica, juntamente com as vazões simulada pelo HEC-HMS, para o tempo de retorno de 5 anos, a vazão de Assis Brasil apresenta uma menor variabilidade dos resultados com base nas distribuições teóricas, no entanto para Brasiléia a vazão simulada é superior, enquanto que para as demais cidades as vazões simuladas são menores, conforme Tabela 14.

Tabela 14: Vazões máximas com base nas distribuições para o TR = 5 anos

Município	Estação	Gumbel	Log-Normal	Log-Person III	HEC-HMS
Assis Brasil	13450000	1.224,12	1.312,01	1.288,81	1.384,10
Brasiléia	13470000	1.177,04	1.172,76	1.165,71	1.470,70
Xapuri	13550000	1.558,41	1.596,75	1.603,37	1.300,70
Rio Branco	13600002	2.035,89	2.024,30	2.002,04	1.407,30
Floriano Peixoto	13650000	2.746,75	2.818,65	2.824,38	2.373,40

A análise conjunta dos Gráfico 21, Gráfico 22, Gráfico 23 e Gráfico 24 revela que as vazões simuladas para os municípios de Assis Brasil, Brasiléia e Xapuri apresentam menor variabilidade no tempo de retorno de 5 anos. Essa tendência contrasta com os demais tempos de retorno, onde as vazões exibem um comportamento mais variável. No caso de Rio Branco, as vazões simuladas mostram variações aceitáveis para os tempos de retorno de 25, 50 e 100 anos, mas para o tempo de retorno de 5 anos, a variabilidade é significativamente maior.

Por outro lado, para a cidade de Floriano Peixoto, as vazões simuladas também apresentam menor variabilidade no tempo de retorno de 5 anos; no entanto, essa variabilidade é inferior em comparação às distribuições observadas para outros períodos. Esses resultados indicam que a dinâmica das vazões é influenciada pelo tempo de retorno, refletindo diferentes padrões de comportamento hidrológico nas diversas localidades analisadas.

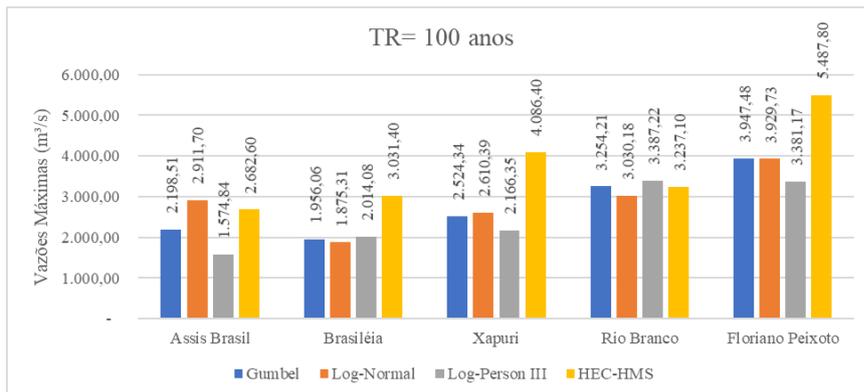


Gráfico 21: Comparativo de vazões máximas TR = 100 anos

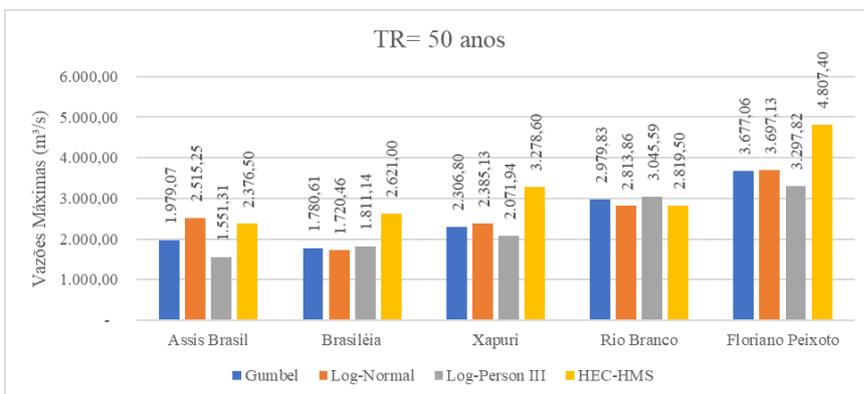


Gráfico 22: Comparativo de vazões máximas TR = 50 anos

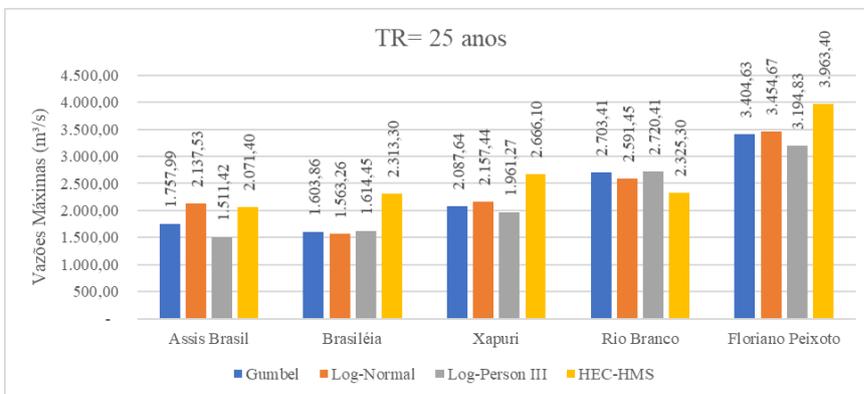


Gráfico 23: Comparativo de vazões máximas TR = 25 anos

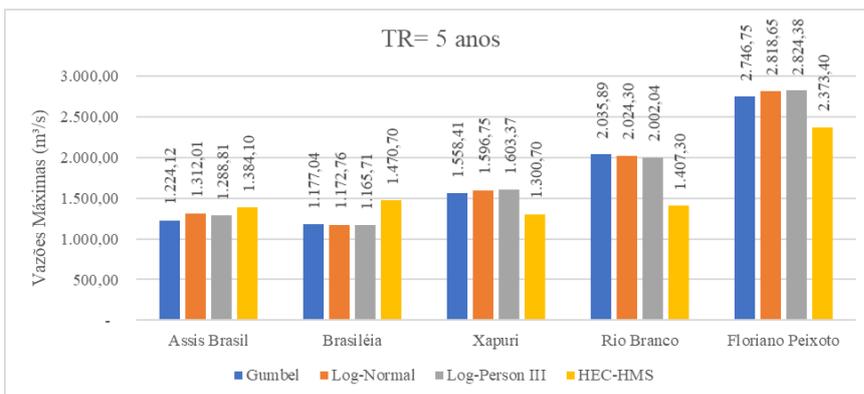


Gráfico 24: Comparativo de vazões máximas TR = 5 anos

6. CONCLUSÕES

A presente dissertação abordou de maneira abrangente as dinâmicas hidrológicas da bacia hidrográfica do Rio Acre, destacando a importância das características fisiográficas, dos hietogramas de chuvas e das variáveis hidrológicas nas respostas dos cursos d'água. A análise das sub-bacias revelou que a baixa declividade e a forma alongada das bacias contribuem significativamente para a mitigação das enchentes. Em particular, a declividade reduzida dos trechos dos rios e a alta sinuosidade dos canais meândricos desempenham um papel essencial no amortecimento do hidrograma de cheia, permitindo uma resposta hidrológica mais controlada diante de eventos de precipitação intensa, o que é crucial para a mitigação de enchentes.

As análises dos hietogramas de chuva, embora limitadas a três curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF), reforçaram a importância de ampliar esses estudos para atender às necessidades específicas de cada município, a fim de melhorar as previsões de cheias e o planejamento hídrico. Os hietogramas de chuvas, que mostraram durações variando entre 40 e 80 horas, foram baseados em um número limitado de dados de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) do Serviço Geológico Brasileiro. Considerando a extensa área da bacia, é fundamental estabelecer uma correlação precisa entre os padrões de precipitação e a probabilidade de eventos, o que se mostra vital para a compreensão das dinâmicas hidrológicas e para a formulação de políticas públicas efetivas.

O estudo do *Curve Number*, altamente sensível às condições de uso do solo e à antropização, com valores variando entre 54,9 e 89,1, o que ressaltou a necessidade de se considerar esses fatores ao modelar respostas hidrológicas. A variação nos valores desse parâmetro mostrou-se significativa, indicando que o impacto da ação humana é um fator preponderante na hidrologia da região.

As simulações de vazões no HEC-HMS apresentaram superestimativas significativas nas cidades de Brasileia e Xapuri para diversos períodos de retorno, quando comparadas análise da estimativa empírica, sugerindo a necessidade de ajustes nos modelos aplicados, especialmente em períodos de retorno menores. Por outro lado, os dados de Assis Brasil mostraram uma coerência com a distribuição log-normal. As vazões máximas simuladas no HEC-HMS, considerando um tempo de retorno de 100 anos, foram de 3.031,4 m³/s para o município de Brasileia, 4.086,4 m³/s para Xapuri e 2.682,6 m³/s para Assis Brasil.

As vazões simuladas em Rio Branco foram compatíveis com as distribuições esperadas para os tempos de retorno de 25, 50 e 100 anos, no entanto, ressalta-se a importância de um

ajuste fino nos modelos hidrológicos utilizados. Esse tipo de refinamento contribuirá para a previsão mais precisa de eventos hidrológicos e para o desenvolvimento de planos de gestão hídrica mais eficazes. A vazão máxima encontrada a partir da modelagem no HEC-HMS com tempo de retorno de 100 anos foi de 5487,8 m³/s.

Para pesquisas futuras, é recomendável um aprimoramento dos dados de IDF, a inclusão de parâmetros de evapotranspiração e a realização de estudos mais detalhados sobre os rios amazônicos. Esses estudos devem focar na determinação precisa das larguras e rugosidades dos rios, uma vez que essas variáveis são cruciais para a modelagem hidrológica precisa e a gestão sustentável dos recursos hídricos. A integração de dados mais robustos e a adoção de metodologias inovadoras contribuirão significativamente para o aumento da resiliência ambiental e para a mitigação dos riscos associados a eventos hidrológicos extremos.

A dissertação, portanto, oferece uma base sólida para o entendimento das complexas dinâmicas hidrológicas do Rio Acre, servindo como referência para futuras pesquisas e para o desenvolvimento de estratégias de gestão hídrica que considerem as especificidades ambientais e sociais da região amazônica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACRE. Secretaria de Estado de Meio Ambiente (2012). **Plano estadual de recursos hídricos do Acre**. Rio Branco: SEMA.
- ABREU, Fernando Girardi de; SOBRINHA, Lôide Angelini; BRANDÃO, João Luiz Boccia. **Análise da distribuição temporal das chuvas em eventos hidrológicos extremos**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 22, n. 02, p. 239-250, 2017.
- ABUD, E. A. *et al.* **Caracterização morfométrica das sub-bacias no município de Xapuri: subsídios à gestão territorial na Amazônia Ocidental**. Revista Ambiente & Água, v. 10, n. 2, p. 431-441, 2015.
- ANA - Agência Nacional de Águas. Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos. **Países**. Brasília: ANA, 2010. *Shapefile*. Projeção UTM. Datum SIRGAS 2000. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/7cfd53c4-b4e1-4aba-a79b-857a19649df6>. Acesso em: 15 jul. 2024.
- ANA - Agência Nacional de Águas. Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos. **Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 2017**. Brasília: ANA, 2019. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/0c698205-6b59-48dc-8b5e-a58a5dfcc989>. Acesso em: 15 jul. 2024.
- ANA - Agência Nacional de Águas. Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica. **Estações Fluviométricas e Pluviométricas da Rede**. Brasília: ANA, 2023. *GeoPackage*. Projeção UTM. Datum SIRGAS 2000. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/files/f85dbf06-a869-414c-afc5-bb01869e9156/EstacoesRHN.gpkg>. Acesso em: 15 jul. 2024.
- ANA - Agência Nacional de Águas. Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica. **HIDROWEB**. Brasília: ANA, 2024. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Acesso em: 15 jul. 2024.
- ANDRADE, C. J. S. **Modelagem hidráulica e hidrológica para diagnósticos de áreas susceptíveis a inundações com limitações de dados fisiográficos e hidrometeorológicos: estudo de caso Guidoal-MG**. 2017. 155 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ouro Preto, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Ouro Preto, 2017.
- BACK, Á. J.; CADORIN, S. B.. **Chuvas extremas e equações intensidade-duração-frequência para o estado do Acre**. Revista Brasileira de Ciências Ambientais (RBCIAMB), v. 55, n. 2, p. 159-170, 2020.
- BARRELLA, W. *et al.* **As relações entre as matas ciliares os rios e os peixes**. In: RODRIGUES, R.R.; LEITÃO FILHO; H.F. (Ed.) *Matas ciliares: conservação e recuperação*. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Walter-Barrella/publication/316101395_As_relacoes_entre_as_matas_ciliares_os_rios_e_os_peixes/inks/59a07b63a6fdcc1a31483487/As-relacoes-entre-as-matas-ciliares-os-rios-e-os-peixes.pdf Acessado em 27 de julho de 2024.
- BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2007. Cap. 5. p. 177-241.

BRASIL. **Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997.** Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal e altera o art. 1º da Lei 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm. Acessado em: 20 de julho de 2024.

BRASIL – Ministério das Cidades / Instituto de Pesquisas Tecnológicas –IPT – **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios.** Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007. p. 176

BRASIL – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Os efeitos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos: Desafios para a gestão.** Brasília, 2010. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/panorama-das-aguas/mudancas-climaticas-recursos-hidricos/publicacoes-e-estudos-sobre-mudancas-climaticas>. Acessado em: 30 de julho de 2024.

BRASIL – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Total de estações em operação e gerenciadas pela ANA por UF – Fluviométrica.** Disponível em: <https://dadosabertos.ana.gov.br/maps/126b9fa4131644988506858063c35a5b/about>. Acesso em: 29 de julho de 2024

BRASIL – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2023: informe anual.** Brasília : ANA, 2024. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjunturainforme2023.pdf>. Acessado em: 27 de julho de 2024.

BUFFON, F. T. *et al.* **Previsão de curto prazo de níveis no rio Acre no município de Rio Branco-AC com modelos hidrológicos empíricos na enchente de 2015.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., 2015, Brasília, DF. Anais... Brasília, DF: ABRH, 2015.

CANAL, F. E. L. **Estimativa de vazões de enchente em bacias hidrográficas do Espírito Santo com o uso do modelo HEC-HMS.** *Monography (Graduation in Civil Engineering), Universidade Federal do Espírito Santo* (2011). Disponível em: https://ambiental.ufes.br/sites/ambiental.ufes.br/files/field/anexo/estimativa_de_vazoes_de_enchente_em_bacias_hidrograficas_do_espirito_santo_com_o_uso_do_modelo_hec-hmsl.pdf. Acesso em: 27 de julho de 2024.

CARVALHO, A.T.F. 2020. **Bacia Hidrográfica como unidade de planejamento: Discussão sobre os impactos da produção social na gestão de recursos hídricos no Brasil.** Caderno Prudentino de Geografia; v. 1 n. 42 (2020); 140-161 ; 2176-5774 ; 1413-4551. (Mar. 2020). Disponível em: <https://revista.fct.unesp.br/index.php/cpg/article/view/6953>. Acessado em 29 de julho de 2024.

CABRAL, S. L.; CAMPOS, J. N. B.; SILVEIRA, C. S.; TEIXEIRA, F. A. **Integração do SIG, HEC/HMS e HEC/RAS no mapeamento de área de inundação urbana: aplicação à bacia do rio Greanheiro-CE.** Geociências, v. 35, n. 1, p.90-101, 2016.

CABRAL, V. P.; BRAGA, E. M. **Estudo da implantação de sistemas de drenagem sustentáveis em lote urbano.** CONTRIBUTIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES, v. 17, n. 2, p. e4827-e4827, 2024. Disponível em: <https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/82388>. Acessado em: 30 de julho de 2024.

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

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 6, p. 95-118, 2001.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Bacia do Rio Acre - Característica** Disponível em: < https://www.sgb.gov.br/sace/acre_caracteristicas.php > Acesso em: 27 de fev. 2022.

CRUZ, L. G. A. **Modelagem hidrológica HEC-HMS da bacia hidrográfica do rio Tibagi**. 2019. 92 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

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

DA SILVA, S. S. *et al.* **Amazon climate extremes: Increasing droughts and floods in Brazil's state of Acre**. Perspectives in Ecology and Conservation, v. 21, n. 4, p. 311-317, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S253006442300072X>. Acessado em: 10 de setembro de 2024.

DEVANTIER, Bruce A.; FELDMAN, Arlen D. **Review of GIS applications in hydrologic modeling**. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 119, n. 2, p. 246-261, 1993.

DUARTE, A. F. **As chuvas e as vazões na bacia hidrográfica do rio Acre, Amazônia Ocidental: caracterização e implicações socioeconômicas e ambientais**. Amazônia Ciência e desenvolvimento, v. 6, n. 12, p. 161-183, 2011.

DUARTE, A.F. **As Chuvas na Bacia do Rio Acre e o Fluxo das Águas, em Rio Branco, Amazônia Ocidental**. IXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – Maceió:2011. Disponível em: https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=3&ID=81&SUMARIO=1096&ST=as_chuvas_na_bacia_do_rio_acre_e_o_fluxo_das_aguas_em_rio_branco_amazonia_ocident al. Acessado em: 15 de setembro de 2024.

DUARTE, C.C.; NÓBREGA, R. S.; COUTINHO, R. Q. **Análise climatológica e dos eventos extremos de chuva no município do Ipojuca, Pernambuco**. Revista de Geografia (UFPE) V.32, n.2, 2015. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/revistageografia/article/view/229222>. Acessado em: 10 de setembro de 2024.

ESA - *European Space Agency* (2024). **Copernicus Global Digital Elevation Model**. Distribuído pela *OpenTopography*. <https://doi.org/10.5069/G9028PQB>. Acesso em: 25 de ago. 2024

FARIAS, C. P. C.; PICKBRENNER, K.; PINTO, E. J. A.. **Atlas Pluviométrico do Brasil: Equações Intensidade-Duração-Frequência: Município Xapuri/AC**. Belém: CPRM, 2020.

FARIAS, C. P. C.; PICKBRENNER, K.; PINTO, E. J. A. **Atlas Pluviométrico do Brasil: equações Intensidade-Duração Frequência (Desagregação de Precipitações Diárias)**;

estação pluviométrica: Xapuri, código: 01068000 (ANA), município: Brasileia/AC. Belém: CPRM, 2022.

FRASSON, R. P. M. *et al.* **Global relationships between river width, slope, catchment area, meander wavelength, sinuosity, and discharge.** *Geophysical Research Letters*, v. 46, n. 6, p. 3252-3262, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2019GL082027>. Acesso em: 17 jul. 2024.

FRUTUOSO, G. K. C.; GRIGIO, A. M.; BARROS, T. C. A. N. **Inundações urbanas: um olhar para o planejamento urbano na revisão do plano diretor de Assú-RN, Brasil.** *Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades*, v. 8, n. 61, p. 118-134, 2020.

FURTUNATO, O. M.; PICKBRENNER, K.; PINTO, E. J. A. **Atlas Pluviométrico do Brasil; Equações Intensidade-Duração-Frequência (Desagregação de Precipitações Diárias). Município: Rio Branco/AC. Estação Pluviométrica: Rio Branco, Códigos 00467000 (ANA); 82915 (INMET).** Salvador, BA: CPRM, 2015.

GRACIOSA, Melissa Cristina Pereira; MENDIONDO, Eduardo Mario. **Gestão do risco de inundações no contexto de bacias urbanas brasileiras.** XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, p. 21, 2007.

GONTIJO, Nebai Tavares. **Avaliação das relações de frequência entre precipitações e enchentes raras por meio de séries sintéticas e simulação hidrológica.** 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/REPA-7BUEC6>. Acessado em: 05 de setembro de 2024.

GUTH, P. L. *et al.* **Digital Elevation Models: Terminology and Definitions.** *Remote Sensing*, v. 13, n. 18, p. 3581, 8 set. 2021.

IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais; ANA, Coordenação de Conjuntura e Gestão da Informação. **Bacias e divisões Hidrográficas do Brasil.** Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/3d87216f-e45e-41d8-9837-074c1608fb1e>. Acesso em: 15 jul. 2024.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **AC_Municipios_2022.** Rio de Janeiro: IBGE, 2022a, Shapefile. Projeção UTM. Datum SIRGAS 2000. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 15 jul. 2024.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **BR_UF_2022.** Rio de Janeiro: IBGE, 2022b, Shapefile. Projeção UTM. Datum SIRGAS 2000. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 15 jul. 2024.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **BR_Pais_2022.** Rio de Janeiro: IBGE, 2022c, Shapefile. Projeção UTM. Datum SIRGAS 2000. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 15 jul. 2024.

JAAFAR, H. H.; AHMAD, F. A. **GCN250, global curve number datasets for hydrologic modeling and design.** Figshare, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.7756202.v1>. Acesso em: 17 jul. 2024.

JAAFAR, H. H.; AHMAD, F. A.; EL BEYROUTHY, Naji. **GCN250, new global gridded curve numbers for hydrologic modeling and design**. Scientific data, v. 6, n. 1, p. 145, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0155-x>. Acesso em: 17 jul. 2024.

KICH, E. M.; MELATI, M. D.; MARCUZZO, F. F. N. **Estudo do regime hídrico pluvial e fluvial na sub-bacia 86 visando a determinação do seu ano hidrológico**. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Brasília: 2015.

LIMA, A. J. R.; NERY, J. T.. **Revisitando o conceito de bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gestão e a governança das águas**. Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento, v. 1, p. 726-738, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.1846>. Acessado em 29 de julho de 2024.

LIMA, J. S. D. *et al.* **Caracterização fisiográfica das bacias hidrográficas dos rios Indaiá e Borrachudo como etapa pré-operacional para a indústria de hidrocarbonetos não convencionais**. Paraná: Atena, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.22533/at.ed.712210207>. Acessado em 29 de julho de 2024.

LYRA, G. B. *et al.* **Coefficiente de rugosidade de Manning para o rio Paracatu**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 14, p. 343-350, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000400001>. Acessado em 29 de julho de 2024.

MACEDO, R. L. **Estudo Hidrológico da Bacia do Rio Negrinho-SC utilizando o HEC HMS. TCC, Engenharia Sanitária Ambiental**, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/124312/24.pdf?sequence=1>. Acessado em: 05 de setembro de 2024.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. Tese (doutorado), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002

MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; BESKOW, S. **Hidrologia de superfície: princípios e aplicações**. 2. ed. Lavras: Ed. UFLA, 2020.

MONTE, B. E. O.; COSTA, D. D.; CHAVES, M. B.; MAGALHÃES, L. F. O.; USO, V. B. **Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada ao mapeamento de áreas inundáveis**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 21, n. 1, p. 152-168, 2016.

MONTEFUSCO, C. L. A.; TAMWING, D. S.; CRUZ, W. M. C.; MOREIRA, J. G. V.; SERRANO, R. O. P. **Direito e diretrizes de acesso à água: contexto geral e abordagem para a cidade de Rio Branco, Acre, Brasil**. Enciclopédia Biosfera, v. 18, n. 37, p.171 – 190, 2021.

MUNIZ, T. **Enchente atinge mais de 120 mil pessoas no Acre e já é considerada, proporcionalmente, o maior desastre ambiental do estado**. [S.I.]: Governo do Estado do Acre. Atualizado em 05 mar. 2024. Disponível em: <https://agencia.ac.gov.br/enchente-atinge-mais-de-120-mil-pessoas-no-acre-e-ja-e-considerada-proporcionalmente-o-maior-desastre-ambiental-do-estado/>. Acessado em 05 de setembro de 2024.

NAGHETTINI, M. **Engenharia de recursos hídricos**. Belo Horizonte: UFMG, 1999.

NAGHETTINI, Mauro; PINTO, Éber José de Andrade. **Hidrologia estatística**. CPRM, 2007.

NETO, A. R. *et al.* **Caracterização da formação de cheias na bacia do rio Una em Pernambuco: simulação hidrológica-hidrodinâmica.** Porto Alegre: Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Disponível em: https://abrh.s3.saeast1.amazonaws.com/Sumarios/157/028a94920a4052f5f14cd91b1a2e1872_b54f8549fb16f1d4d4d83a5b1e75e4c8.pdf. Acesso em, v. 26, 2021.

OLIVEIRA, A. V.; SERRANO, R. O. P.; MESQUITA, A. A.; MOREIRA, J. G. V. **Temporal trend and estimation of the hydrological risk of maximum rainfall and flow extremes in the city of Rio Branco, Acre, Brazil.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 36, n. 4, p.749-758, 2021.

POMPERMAYER, R.C. **Modelagem hidrológica: técnicas de geoprocessamento aplicadas ao modelo SCS Soilcon Servation Service Curve Number.** Minas Gerais: 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/IGCM-9QEM87>. Acessado em: 05 de setembro de 2024.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica.** 4ª edição. São Carlos: EESC-USP, Projeto REENGE, 2006.

OUÉDRAOGO, Wendso Awa Agathe; RAUDE, James Messo; GATHENYA, John Mwangi. **Continuous modeling of the Mkurumudzi River catchment in Kenya using the HEC-HMS conceptual model: Calibration, validation, model performance evaluation and sensitivity analysis.** Hydrology, v. 5, n. 3, p. 44, 2018.

RIBEIRO, C. B. M.; LIMA, R. N. S. **Simulação de inundações urbanas a partir da integração de técnicas de geoprocessamento à modelagem hidráulica e hidrológica.** Revista Geografia, v. 2, n. 1, p.1-9, 2011.

ROAF, S.; CRICHTON, D.; NICOL, F.. **A adaptação de edificações e cidades às mudanças climáticas: um guia de sobrevivência para o século XXI.** Bookman Editora, 2009.

ROCHA, E. G. A. **Conceitos Básicos de Hidrologia e Drenagem para Projetos Rodoviários. 2023.** Disponível em: <https://repositorio.enap.gov.br/handle/1/7814>. Acessado em 29 de julho de 2024.

ROCHA F. L. **Modelagem utilizando o HEC HMS: estudo hidrológico da bacia do igarapé são Francisco em Rio Branco-AC:** Rio Branco: Uninorte, 2022.

SAHU, Mukul Kumar; SHWETHA, Hassan R.; DWARAKISH, Gowdagere S. **State-of-the-art hydrological models and application of the HEC-HMS model: a review.** Modeling Earth Systems and Environment, v. 9, n. 3, p. 3029-3051, 2023.

SANTANA, Derli Prudente. **Manejo integrado de Bacias Higrográficas.** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPMS/16221/1/Doc_30.pdf. Acessado em 29 de julho de 2024.

SANT'ANNA, F. M. **Bacia do rio Acre: a formação de uma governança transnacional. In: Governança multiescalar dos recursos hídricos transfronteiriços na Amazônia [online].** São Paulo: Editora Unesp, 2017, pp. 199-269.ISBN: 978-85-9546-180-2.

SANTOS, J. B. **Modelagem hidrológica HEC-HMS da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés, Botucatu-SP.** 2017. 78 f. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP, Botucatu, 2017.

SILVA, António Oliveira da. **Estratégias para construir cidades resilientes**. 2018. Dissertação de Mestrado. Disponível em: <https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/82388>. Acessado em: 10 de setembro de 2024.

SONG, Xiaomeng et al. **Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications**. Journal of hydrology, v. 523, p. 739-757, 2015.

SOUZA, R. M.; CRISPIM, D. C.; FORMIGA, K. T. M. **Estudo comparativo entre os modelos SWMM e HEC-HMS para simulação de escoamento superficial – caso de estudo bacia do Córrego Samambaia**. REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 5, n. 2, 2012.

SOUZA, R. R. **Aplicação do HEC-HMS para simulação de vazões na bacia do Rio Taquari**. São Leopoldo: 2019. Disponível em: <https://repositorio.jesuita.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/11432/Renan+da+Rosa+Souza.pdf?sequence=1>. Acessado em: 05 de setembro de 2024.

SOUZA, F. A. S.; VIEIRA, V. R.; SILVA, V. P. R.; MELO, V. S.; GUEDES, R. W. S. **Estimativas dos riscos de chuvas extremas nas capitais do Nordeste do Brasil**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 9, n. 2, p.430-439, 2016.

SOUZA, T. C. T. **Avaliação de vazões máximas estimadas a partir dos modelos HEC-HMS e SWMM: estudo de caso para o núcleo urbano e região periurbana de Muniz Freire**. 2017. 114 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, Vitória, 2017.

SCHUMM, S. A. **Evolution Of Drainage Systems And Slopes In Badlands At Perth Amboy, New Jersey**. Geological Society of America Bulletin, 67(5), 597. 1956. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO);

TAMWING, D. S.; MONTEFUSCO, C. de L. A.; SERRANO, R. O. P.; MESQUITA, A. A.; MOREIRA, J. G. do V.. **Characterization of the fluvial regime of the Acre river basin**. Research, Society and Development, [S. l.], v. 10, n. 17, p. e93101724461, 2021.

TEODORO, V. L. I. *et al.* **O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local**. Revista Brasileira Multidisciplinar, v. 11, n. 1, p. 137-156, 2007.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

TUCCI, C. E. *et al.* **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 3. ed. UFRGS: Associação Brasileira de recursos Hídricos, 2009.

TUCCI, C. E. M. **Escoamento superficial**. In: TUCCI, C. E. M (org.). Hidrologia: Ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2012, p.392-441.

URBANI, L. G.; GRACIOSA, M. C. P.; VALVERDE, M. C. **Delimitação de manchas de inundação na Bacia do Córrego do Ipiranga, São Paulo-SP, Brasil, com modelagem hidrológico-hidráulica**. Revista de Gestão de Água da América Latina, v. 20, e13, 2023.

U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS - USACE. **HEC-HMS**. Versão 4.3. Disponível em: [HEC-HMS \(army.mil\)](https://www.hec.usace.army.mil) . Acesso em: 10 de julho de 2024.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill, 1975. 245 p., il., 22 cm.

WING, O. E.; PINTER, N.; BATES, P. D.; KOUSKY, C. **New insights into US flood vulnerability revealed from flood insurance big data**. Nature Communications, v. 11, n. 1, p.1444, 2020.

ZENG, Z., TANG, G., HONG, Y., ZENG, C. & YANG, Y. **Development of an NRCS curve number global dataset using the latest geospatial remote sensing data for worldwide hydrologic applications**. Remote Sensing Letters 8, 528–536 (2017).

**APÊNDICE A – Memória de cálculo para elaboração do Hietograma de
Projeto para TR de 100 anos**



**APÊNDICE B – Memória de cálculo para elaboração do Hietograma de
Projeto para TR de 50 anos**



**APÊNDICE C – Memória de cálculo para elaboração do Hietograma de
Projeto para TR de 25 anos**



**APÊNDICE D – Memória de cálculo para elaboração do Hietograma de
Projeto para TR de 5 anos**



APÊNDICE E – Resultados das vazões máximas simuladas no HEC-HMS

APÊNDICE F – Vazões máximas com base nas distribuições teóricas