

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

THIAGO FERREIRA GOMES

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DE EVENTOS DE ENCHENTES NA BACIA DO RIO
IBIRAPUITÃ, ALEGRETE-RS: SIMULAÇÕES COM O MODELO HEC-HMS**

**Alegrete
2024**

THIAGO FERREIRA GOMES

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DE EVENTOS DE ENCHENTES NA BACIA DO RIO
IBIRAPUITÃ, ALEGRETE-RS: SIMULAÇÕES COM O MODELO HEC-HMS**

Defesa de dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Dr. Rafael Maroneze

Coorientador: Dr. Luiz Eduardo Medeiros

**Alegrete
2024**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

G633m Gomes, Thiago Ferreira

MODELAGEM HIDROLÓGICA DE EVENTOS DE ENCHENTES NA BACIA DO
RIO IBIRAPUITÃ, ALEGRETE-RS: SIMULAÇÕES COM O MODELO HEC-HMS /
Thiago Ferreira Gomes.

88 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIA, 2024.

"Orientação: Rafael Maroneze".

1. Mudanças Climáticas. 2. Gestão de Recursos Hídricos. 3.
Modelagem Hidrológica. 4. HEC-HMS. 5. Estratégias de
Mitigação. I. Título.

THIAGO FERREIRA GOMES

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DE EVENTOS DE ENCHENTES NA BACIA DO RIO IBIRAPUITÃ,
ALEGRETE-RS: SIMULAÇÕES COM O MODELO HEC-HMS**

Dissertação apresentada ao Programa de Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Dissertação defendida e aprovada em: 05 / 07 / 2024

Banca examinadora:

Prof. Dr. Rafael Maroneze

Orientador

UNIPAMPA

Prof. Dr. Luiz Eduardo Medeiros

Coorientador

UNIPAMPA

Prof. Dr. Vagner Anabor

UFSM

Prof. Dr. Vinícius dos Santos Cunha

UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **RAFAEL MARONEZE, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/07/2024, às 17:10, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Vagner Anabor, Usuário Externo**, em 06/07/2024, às 16:13, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **VINICIUS DOS SANTOS CUNHA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/07/2024, às 17:48, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUIZ EDUARDO MEDEIROS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/07/2024, às 18:36, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1468021** e o código CRC **8F200009**.

Dedico esse trabalho aos meus avós (in memoriam), María Luísa Piffero Gomes e Donato Rocha Gomes.

AGRADECIMENTO

Primeiramente, gostaria de expressar minha gratidão à minha família, que é a base de tudo. Em especial, ao meu pai Rivelino e mães Nara e Cláudia. Sem vocês, nada disso seria possível. Agradeço por serem minha rocha e por me ajudarem a enfrentar mais uma etapa. Sempre será por vocês. Ao meu primo Lorenzo, à irmã Beatriz, ao afilhado Bernardo e à tia Nara, agradeço por tudo e por estarem sempre presentes em minha vida. Todos vocês me ajudaram a me tornar quem sou hoje e sempre deram o melhor para me favorecer de alguma maneira.

Amigos, Luíza, Beatriz, Thiago, Eduardo, Tito, Andressa, Ana Flávia, Joice e Marcelo, gostaria de expressar minha profunda gratidão por estarem presentes quando mais precisei ao longo dessa jornada de mestrado. Agradeço pelas noites de estudo sem dormir e pelos momentos memoráveis que compartilhamos juntos. Alegrete não seria a mesma sem a presença e o apoio de vocês.

Para os meus melhores, Andressa, Maiara, Patrick e Lucieli, que moldaram aquele menino de 17 anos que era tímido e precisava de um empurrão, agradeço por serem o meu norte e por me guiarem na direção correta. Saibam que foram e serão meu suporte para toda a vida.

Esta pesquisa só foi possível graças ao esforço e aos puxões de orelha de uma pessoa incrível, o Prof. Rafael Maroneze. Que me apoia diariamente e se dedica incansavelmente para ensinar e aprimorar futuros pesquisadores. Obrigado por ser essa pessoa excepcional, você é show. Os mesmos agradecimentos são estendidos aos professores Felipe Denardin e Luiz Eduardo Medeiros, que criaram um ambiente maravilhoso, o Laboratório de Fluidodinâmica Computacional e Turbulência Atmosférica, que sempre será como um lar.

RESUMO

Este estudo aborda a problemática das enchentes em Alegrete-RS, uma cidade suscetível a eventos climáticos extremos resultantes de intensas precipitações, devido à sua localização em uma região sujeita a inundações. Para monitorar a cota e as vazões do rio, podem ser utilizadas técnicas de rastreamento baseadas em dados de satélite e informações de entidades. Buscando verificar esses eventos, é proposta uma simulação para analisar as cheias, utilizando índices climáticos e modelagem com o software HEC-HMS, abrangendo uma análise de 40 anos, de 1982 à 2021. A metodologia inclui o uso de modelos do SCS, como o CN, para estimar o excesso de precipitação, e o modelo de hidrograma unitário para calcular hidrogramas de cheia. Conseguindo explorar os diferentes aspectos presentes na bacia do Rio Ibirapuitã, com o uso de dados pontuais de estações da ANA, dados em grade do BR-DWGD, bem como diferentes tipos de solo, uso do solo e características do relevo. Com isso, no entendimento da dinâmica hidrológica na região, são fornecidos *insights* essenciais para o planejamento e gestão sustentável dos recursos hídricos, através de políticas públicas eficazes, com práticas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas globais. Através do que é proposto, foram realizadas simulações para todo o período histórico de análise, separando as vazões pela data de ocorrência das maiores cheias, com variações temporais de dois, quatro e seis meses. A climatologia implementada destaca diferentes regimes de precipitação, com um limiar de precipitação média de 166,3 mm nos 40 anos de análise, podendo gerar um aumento na cota do rio após o escoamento. Outro fator verificado é a infiltração do solo, que varia conforme o método utilizado, sendo que o SCS determina que o tempo de variação temporal deve ser curto para uma melhor modelagem. Para tal, os resultados apresentados corroboram que, para os anos de 1991, 1992 e 1998, as simulações apresentam melhores resultados para os índices NS e R^2 , diferindo dos anos de 2009 e 2019, que apresentam valores satisfatórios de R^2 , mas resultados discrepantes para o NS. Assim, cada evento ocorre de maneira distinta, variando conforme a pluviosidade em cada intervalo de tempo na região da bacia.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas; Gestão de Recursos Hídricos; Modelagem Hidrológica; HEC-HMS; Hidrograma Unitário SCS; Estratégias de Mitigação.

ABSTRACT

This study addresses the issue of floods in Alegrete-RS, a city susceptible to extreme weather events resulting from heavy precipitation, due to its location in a flood-prone region. To monitor river levels and flows, satellite-based tracking techniques and data from relevant entities are proposed. In order to verify these events, a simulation is proposed to analyze floods, using climate indices and modeling with HEC-HMS software, covering a 40-year period from 1982 to 2021. The methodology includes the use of SCS models like the CN to estimate excess precipitation, and the unit hydrograph model to calculate flood hydrographs. Exploring various aspects within the Rio Ibirapuitã basin involves using point data from ANA stations, grid data from BR-DWGD, as well as different soil types, land use, and terrain characteristics. This understanding of hydrological dynamics in the region provides essential insights for sustainable water resource planning and management through effective public policies, incorporating mitigation practices and adaptation to global climate change. Simulations were conducted for the entire historical analysis period, categorizing flows by date of occurrence of major floods, with temporal variations of two, four, and six months. The implemented climatology highlights different precipitation regimes, with an average precipitation threshold of 166.3 mm over the 40-year analysis period, potentially leading to increased river levels after runoff. Another factor examined is soil infiltration, which varies depending on the method used; SCS determines that temporal variation should be short for better modeling. The results presented corroborate that simulations for the years 1991, 1992, and 1998 show better NS and R^2 indices, differing from 2009 and 2019, which exhibit satisfactory R^2 values but disparate NS results. Thus, each event occurs differently, varying with rainfall patterns within each time interval in the basin region.

Keywords: Climate Change, Water Resources Management, Hydrological Modeling, HEC-HMS, SCS Unit Hydrograph, Mitigation Strategies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Demonstração da cheia em duas diferentes zonas do município de Alegrete-RS	21
Figura 2 – Aspectos de classificação de modelos hidrológicos	22
Figura 3 – Modelo de estação meteorológica do INMET	24
Figura 4 – Instrumento fluviométrico da cidade de Alegrete-RS	25
Figura 5 – Curva-chave para a bacia do Ibirapuitã	26
Figura 6 – Hidrograma de projeto	27
Figura 7 – Processos hidrológicos que podem ser simulados no HEC-HMS . .	28
Figura 8 – Interpretação física de cada uma das componentes presentes em uma simulação hidrológica com HEC-HMS	30
Figura 9 – Processos para uma simulação hidrológica no HEC-HMS	31
Figura 10 – Hidrograma unitário triangular SCS	34
Figura 11 – Regiões da ENOS sobre o Oceano Pacífico Equatorial	37
Figura 12 – Fluxograma metodológico	38
Figura 13 – Localização da área de estudo	39
Figura 14 – Estações da ANA na bacia do rio Ibirapuitã	40
Figura 15 – Tipos pedológicos da bacia do rio Ibirapuitã	41
Figura 16 – Tipos de Uso e Ocupação do Solo ao ano de 2021	43
Figura 17 – Diferença do Uso e Ocupação do solo nas últimas duas décadas . .	43
Figura 18 – Representação da declividade na bacia	45
Figura 19 – Representação da sub-bacia gerada no modelo HEC-HMS até o exutório	46
Figura 20 – Aplicação dos modelos dentro do HEC-HMS	48
Figura 21 – <i>Curve Number</i> calculado para a sub-bacia	49
Figura 22 – <i>Box plot</i> para Precipitação Acumulada Mensal	53
Figura 23 – Precipitação acumulada anual	54
Figura 24 – A ocorrência de eventos extremos (a) e a ocorrência de eventos extremíssimos (b)	55

Figura 25 – Máxima precipitação acumulada em um dia (a) e cinco dias (b) . . .	56
Figura 26 – <i>Box plot</i> para cota diária do rio Ibirapuitã para cada um dos meses do ano	57
Figura 27 – Ocorrência anual de eventos de enchentes na bacia	58
Figura 28 – Ocorrência mensal de eventos de enchentes na bacia ao longo de todo o período histórico	58
Figura 29 – Ocorrência de enchentes com os períodos El Niño, La Niña e Neutro	59
Figura 30 – Malhas de inundações com as cotas de 8,45m, 13,00m e 14,45m .	60
Figura 31 – Diagramas de dispersão para vazão simulada e observada considerando a precipitação provenientes dos produtos BR-DWGD e CHIRPS . .	61
Figura 32 – Comparação entre os dados observados e os simulados no período de calibração de 1982-2021.	63
Figura 33 – Diagrama de dispersão entre as vazões simuladas e observadas utilizando série histórica precipitação em um período de 40 anos (superior) e 30 anos (inferior) do BR-DWGD	64
Figura 34 – Comparação entre os dados observados e os simulados em uma simulação de dois meses	66
Figura 35 – Comparação entre os dados observados e os simulados em uma simulação de quatro meses	67
Figura 36 – Comparação entre os dados observados e os simulados em uma simulação de seis meses	68
Figura 37 – Representação das cotas d'água dos dados observados e simulados após a modelagem	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Maiores enchentes no município de Alegrete-RS	20
Tabela 2 – Grupos hidrológicos para o <i>Curve Number</i> (CN)	34
Tabela 3 – Áreas da declividade da bacia do rio Ibirapuitã	44
Tabela 4 – Equações utilizadas para determinar o Tempo de concentração inicial	50
Tabela 5 – Parâmetros da sub-bacia do rio Ibirapuitã e valores do Tempo de concentração	50
Tabela 6 – Valor médio dos parâmetros da sub-bacia do rio Ibirapuitã e valores do Tempo de concentração	50
Tabela 7 – Parâmetros iniciais das modelagens hidrológicas	51
Tabela 8 – Áreas de inundação das zonas em diferentes cotas	59
Tabela 9 – Valores para as cotas simuladas e observadas para cada evento da bacia	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ANA</i>	Agência Nacional de Águas
<i>CEMADEN</i>	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
<i>CN</i>	Curve Number
<i>CNM</i>	Confederação Nacional de Municípios
<i>CNRH</i>	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
<i>CPC</i>	Centro de Previsão do Clima
<i>CPTEC</i>	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
<i>CWD</i>	Consecutive Wet Days
<i>ETCCDI</i>	Expert Team of Climate Change Detection Indices
<i>ENSO</i>	El Niño-Southern Oscillation
<i>HEC</i>	Hydrologic Engineering Center
<i>HMS</i>	Hydrologic Modeling System
<i>HU</i>	Hidrograma Unitário
<i>I_a</i>	Initial Abstraction
<i>IBGE</i>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<i>INMET</i>	Instituto Nacional de Meteorologia
<i>INPE</i>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
<i>IPCC</i>	Intergovernmental Panel on Climate Change
<i>MDE</i>	Modelo Digital de Elevação
<i>NCDC</i>	National Centers for Environmental Information
<i>NOAA</i>	National Oceanic and Atmospheric Administration
<i>NRCS</i>	Natural Resource Conservation Service
<i>NMM</i>	Nível Médio dos Mares
<i>ONI</i>	Oceanic Niño Index
<i>QGis</i>	Quantum Gis
<i>RP</i>	Ratio to Peak
<i>RC</i>	Recession Constant
<i>SAGA</i>	Sistema de Análises Geocientíficas Automatizado

<i>SIG</i>	Sistema de Informações Georreferenciadas
<i>SCS</i>	Soil Conservation Service
<i>TSM</i>	Temperatura da Superfície do Mar
<i>US</i>	United States
<i>USACE</i>	United States Army Corps of Engineers

LISTA DE SÍMBOLOS

P_e	Precipitação efetiva
P	Precisão Acumulada em um dado modelo
S	Potencial máximo de retenção do solo
I_a	Abstração inicial
Q_t	Vazão de escoamento superficial em um intervalo de tempo
b	Vazão por unidade de chuva efetiva do hidrograma unitário
k	Número de ordenadas do hidrograma unitário
$RX1day_j$	Precipitação máxima acumulada ao longo de um dia
$RX5day_j$	Precipitação máxima acumulada ao longo de cinco dia
Pr_{ij}	Precipitação acumulada durante um intervalo de um dia
Pr_{kj}	Precipitação acumulada durante um intervalo de cinco dias
T_c	Tempo de concentração
L	Comprimento do talvegue
S_t	Declividade do talvegue
RP	Razão do Pico
RC	Constante de Recessão
ID	Descarga Inicial
Q	Vazão
NS	Nash–Sutcliffe
R^2	Coefficiente de determinação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1	Maiores enchentes	20
3.2	Modelos Hidrológicos	21
3.2.1	Precipitação	23
3.2.2	Vazão	25
3.2.2.1	Hidrograma de projeto	26
3.3	<i>Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System</i>	27
3.3.1	Modelo de Infiltração e Volume de Escoamento: <i>Curve Number Loss Model</i>	32
3.3.2	Modelo de Escoamento direto: <i>SCS Unit Hydrograph</i>	34
3.4	Índices climatológicos	35
3.4.1	<i>El Niño-Southern Oscillation</i>	36
4	METODOLOGIA	38
4.1	Área de estudo	38
4.1.1	Pedologia	40
4.1.2	Uso e Ocupação do Solo	42
4.1.3	Características do Relevo	43
4.2	Procedimentos para o Modelo Hidrológico	45
4.2.1	Divisão e caracterização das Sub-bacias	45
4.3	Aplicação dos Modelos no HEC-HMS	46
4.3.1	Parâmetros e constantes iniciais	48
4.3.2	<i>Curve Number</i>	48
4.3.3	Hidrograma unitário	49

4.3.4	Parâmetros iniciais do modelo	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
5.1	Climatologia	52
5.1.1	Impactos das Enchentes no Município de Alegrete	59
5.2	Simulações Hidrológicas	61
5.2.1	Análise dos diferentes conjuntos de dados	61
5.2.2	Calibração e Otimização	61
5.2.3	Estudos de Caso	64
6	CONCLUSÃO	71
	REFERÊNCIAS	73
	ANEXO A – REPRESENTAÇÃO DAS INFILTRAÇÕES NO SOLO PARA AS MAIORES CHEIAS REGISTRADAS	78
	ANEXO B – REPRESENTAÇÃO DOS PICOS DE VAZÃO PARA OS DADOS SIMULADOS E OBSERVADOS	82
	ANEXO C – REPRESENTAÇÃO DOS VALORES FINAIS PARA CADA MODELAGEM SEPARADAMENTE	84
	ANEXO D – REPRESENTAÇÃO DOS GRÁFICOS PARA OS EVENTOS DA SÉRIE HISTÓRICA	85

1 INTRODUÇÃO

Eventos de enchentes são, em geral, decorrentes de fenômenos meteorológicos que podem causar impactos significativos tanto em regiões urbanas quanto rurais. Entre os principais desencadeantes de enchentes, destaca-se a precipitação resultante de fenômenos sinóticos, como ciclones extratropicais, que provocam um aumento considerável no volume de chuvas e resultam em inundações que afetam áreas extensas. As enchentes representam um desafio significativo em várias regiões urbanas, incluindo Alegrete-RS, que está localizada em uma área propensa e suscetível à ocorrência de eventos extremos. A cidade enfrenta inundações periódicas devido ao transbordamento do rio Ibirapuitã. Essas enchentes impactam a vida dos residentes, causando danos materiais, deslocamentos e riscos à saúde pública. Ao analisar as características das enchentes nessa região, incluindo climatologia e simulação hidrológica, é possível obter “*insights*” para o desenvolvimento de estratégias de mitigação e adaptação, visando reduzir os impactos das inundações e promover a resiliência da comunidade local diante da ocorrência de eventos extremos.

Além disso, é fundamental destacar que o sul do Brasil vem experimentando um aumento significativo, tanto na frequência quanto na intensidade de eventos climáticos extremos, como chuvas intensas e inundações, que estão expressamente relacionadas às mudanças climáticas globais, tornando a situação ainda mais desafiadora para a região. O Sexto Relatório do IPCC alerta que o aumento da temperatura global para 1,1 °C acima dos níveis pré-industriais que se deve, principalmente, aos padrões insustentáveis de consumo e produção global, podendo tornar a ocorrência de eventos extremos mais frequente. Além disso, esse relatório destaca que cerca de 3,3 bilhões de pessoas vivem em áreas altamente vulneráveis às mudanças climáticas, especialmente em regiões menos desenvolvidas. No Brasil, eventos extremos, como secas e enchentes, causaram perdas anuais da ordem de R\$13 bilhões, segundo dados do Banco Mundial (*World Bank*). Entre 2013 e 2022, desastres naturais como tempestades, inundações, enxurradas e alagamentos afetaram 93% dos municípios brasileiros, conforme dados da Confederação Nacional de Municípios (CNM). A Região Sul do país teve o maior percentual de residências afetadas, acumulando um prejuízo financeiro de 4 bilhões de reais. Esse fato destaca a urgência de medidas para enfrentar as mudanças climáticas e seus impactos (KOPEGINSKI; LINDINO, 2023).

Uma das maiores cheias da bacia do Rio Ibirapuitã foi registrada em 1984 e afetou substancialmente as cidades vizinhas, principalmente a cidade de Alegrete. As águas se elevaram rapidamente, deixando uma grande quantidade de propriedades destruídas, o que obrigou muitas famílias a deixarem suas casas. Esses aumentos periódicos causam diversos problemas na região, configurando um padrão de inundações nas áreas urbanas da bacia, que podem ser facilitadas pela geografia

e climatologia presente no local (GONZATO, 2019).

Com a intensificação das mudanças climáticas e a ocorrência cada vez mais frequente de desastres naturais, as autoridades e organizações de gestão desses acontecimentos devem trabalhar continuamente para melhorar as medidas de prevenção, resposta e recuperação, buscando minimizar os efeitos desses eventos naturais. Na prevenção, pode-se destacar a importância do sistema de alertas, que utilizam dados provenientes de modelos de previsão do tempo acoplados a modelos hidrológicos. Um sistema de alerta não irá eliminar completamente os custos e danos causados por uma enchente, mas ajuda a minimizar. Sua importância reside em salvar vidas, pois permite que a população se prepare com antecedência, e para o desenvolvimento de um sistema de alerta, é fundamental a calibração de um modelo hidrológico, como o modelo hidrológico HEC-HMS. Ferramenta utilizada por engenheiros e cientistas que trabalham na área de recursos hídricos, desempenhando um papel fundamental em várias atividades, sendo altamente adaptável e aplicável a uma ampla variedade de situações hidrológicas, contribuindo para a gestão de recursos hídricos (BAI; ZHANG; ZHAO, 2019). Ele é utilizado na modelagem de chuva-vazão, para projetos hidráulicos, análise de inundações e elaboração de planos de emergência. Além disso, fornece estudos de manejo de bacias hidrográficas, avaliando o impacto de mudanças no uso do solo e práticas de conservação da água.

Frente às constantes ameaças de enchentes que assolam a bacia da região, torna-se fundamental a implementação de estratégias eficazes de prevenção e gestão de desastres naturais. Com essas inundações recorrentes, desencadeadas pelo transbordamento do rio Ibirapuitã, é importante destacar a urgência de investimentos em tecnologias e abordagens que possam atenuar os impactos desses eventos extremos. Nesse contexto, a calibração e a utilização do modelo proposto pelo HEC-HMS emergem como uma proposta à aplicação, proporcionando ferramentas avançadas de modelagem hidrológica capazes de prever e projetar distintos cenários de inundação, avaliar riscos e elaborar estratégias de resposta às condições específicas do clima local. Além disso, o HEC-HMS pode fornecer embasamento teórico sobre a viabilidade para mitigar as enchentes, tais como a implementação de um sistema de bombas ou a construção de canais com o intuito de diminuir os danos causados pelo transbordamento do rio. A colaboração direta entre autoridades municipais, especialistas em recursos hídricos e membros da comunidade, é viável fortalecer a resiliência da região, reduzindo os prejuízos materiais, aumentando a segurança e o bem-estar dos habitantes diante da imprevisibilidade dos fenômenos climáticos extremos.

2 OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo simular, com o HEC-HMS, eventos de enchentes na bacia do rio Ibirapuitã, gerando uma climatologia, caracterização da bacia e calibração do modelo, promovendo discussões que possam subsidiar a implementação de políticas e práticas mais eficientes na gestão de enchentes.

- Apresentar uma climatologia e as maiores enchentes registradas durante o período de 1982 a 2021.
- Caracterizar e calibrar o modelo hidrológico através da série histórica de 40 anos, desde 1982 até 2021.
- Verificar um intervalo de simulação adequado para a simulação de eventos específicos de enchente.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo será apresentado um panorama histórico, abrangendo as 10 maiores enchentes registradas na bacia do rio Ibirapuitã. Com isso, serão introduzidos conceitos fundamentais relacionados à hidrologia e modelagem hidrológica, fornecendo uma base de fundamentação teórica para o entendimento dos modelos implementados no modelo do HEC-HMS. Por uma descrição minuciosa dos modelos empregados, destacando suas características, funcionalidades e métodos de aplicação para a análise e previsão de eventos de cheia na bacia do rio Ibirapuitã.

3.1 Maiores enchentes

Em alguns locais e regiões, às dificuldades são em torno de inundações provenientes do excesso de precipitações, que afetam a população. São listadas as 10 maiores enchentes que ocorreram no município de Alegrete desde o ano de 1940 (GONZATO, 2019) (Tabela 1). Ao menos a metade dos eventos listados ocorreram nas últimas quatro décadas (1982-2021), período de interesse do presente trabalho. Que é apresentada por fotos aéreas de duas pontes (sobre o regalado e sobre o leito do rio Ibirapuitã) e seus respectivos bairros, que foram atingidos pela enchente do ano de 2019, destacando os transtornos, problemas e desafios enfrentados pela comunidade local (Figura 1).

Tabela 1 – Maiores enchentes no município de Alegrete-RS

Data da leitura	Nível d'água (m)
11/04/1959	14,45
14/01/2019	14,02
20/04/1991	13,65
15/04/1992	13,64
25/11/2009	13,56
15/04/1998	13,52
13/02/1973	13,30
30/04/1941	13,20
03/05/1973	13,02
20/05/1947	13,00

Fonte: Adaptado de Gonzato (2019).

Com a finalidade de monitorar e identificar áreas suscetíveis a eventos de enchentes, diversas técnicas podem ser empregadas. Alguns conjuntos de dados apresentam resultados provenientes de satélites, com informações detalhadas e abrangentes sobre as condições meteorológicas, permitindo a observação de padrões sinóticos e a identificação de potenciais situações de risco. A utilização de Modelos Digitais de Elevação, espelha uma representação da superfície e os elementos

geográficos existentes sobre ela, através das coberturas naturais e artificiais, por uma variação em diferentes locais topográficos (ZHOU, 2017). Além de técnicas de sensoriamento remoto, no Rio Grande do Sul, a ANA conta com 1.347 pluviômetros e 1.278 fluviômetros, que efetuam essa coleta e disponibilizam os dados virtualmente. Um aspecto importante dos dados fornecidos pela ANA é a validação que eles apresentam para a análise dos dados de satélite (MAGGIONI; MASSARI, 2018).

Figura 1 – Demonstração da cheia em duas diferentes zonas do município de Alegrete-RS



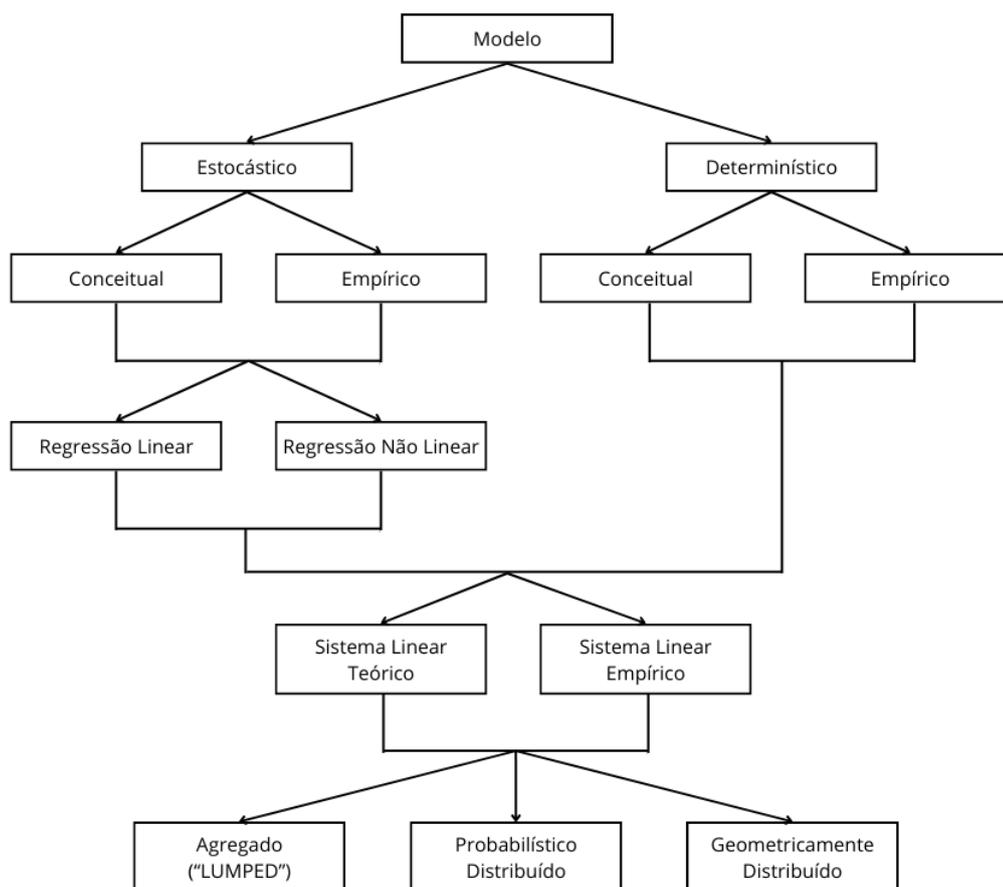
Fonte: G1 (2019).

3.2 Modelos Hidrológicos

Devido à complexidade dos mecanismos hidrológicos e da influência das partes topológicas e geológicas, tem-se a necessidade de modelos matemáticos que identifiquem as estruturas hidrológicas para diferentes áreas. Essas análises podem ser realizadas em locais distintos, permitindo aplicar as modelagens em outras regiões similares, dependendo dos objetivos e características em cada bacia hidrográfica (MORAES *et al.*, 2003).

Passos (1993) apresenta um diagrama que ilustra os processos de modelagem hidrológica de uma melhor maneira (Figura 2). Assim, os modelos podem ser classificados como estocásticos ou determinísticos, tendo em vista que os estocásticos utilizam probabilidades para lidar com incertezas e variabilidades, onde múltiplos resultados são possíveis para as mesmas condições iniciais. Os modelos determinísticos assumem previsibilidade completa, fornecendo um único resultado para cada conjunto de condições iniciais (LOUCKS *et al.*, 2017)

Figura 2 – Aspectos de classificação de modelos hidrológicos



Fonte: Passos (1993 apud BUCHIANERI, 2004).

Quando se abordam conceitos relacionados a essa modelagem, Almeida e Serra (2017) explica que uma rede de informações físicas e climatológicas das bacias hidrográficas possibilita a escolha do modelo a ser adotado com base na necessidade da problemática em estudo, em vez de depender exclusivamente de grandes volumes de dados, o que é comum no Brasil. Esses modelos hidrológicos são ferramentas que simulam os fenômenos do ciclo hidrológico, como chuva, evaporação, infiltração e escoamento. Eles permitem determinar as vazões máximas, empregando técnicas estatísticas para analisar registros históricos de precipitação e vazão, bem como alguns modelos hidrológicos para simular eventos extremos (TUCCI, 1998).

Diversas aplicações, como planejamento urbano, abastecimento de água, tratamento de esgoto, drenagem urbana, controle de enchentes e qualidade da água, os quais são utilizados para simular cenários hipotéticos, avaliar impactos e auxiliar em projetos relacionados em qualquer contexto que envolva a compreensão e gestão dos recursos hídricos (FILHO *et al.*, 2013). Com algumas equações e parâmetros, podem ser representados muitos processos naturais, variando os seus modelos conceituais, empíricos e baseados em processos físicos, para prever eventos hídricos futuros e apoiar decisões públicas (ALMEIDA; SERRA, 2017).

Na modelagem hidrológica, a integração de dados de precipitação, cota e vazão, são cruciais para uma análise precisa dos sistemas hidrológicos. Além disso, a compreensão de conceitos fundamentais, como o hidrograma de projeto, é fundamental.

3.2.1 Precipitação

A precipitação é um dos principais componentes do ciclo hidrológico, que é na recarga de aquíferos, na alimentação de rios e na manutenção dos ecossistemas aquáticos e terrestres. TUCCI *et al.* (2009) abordam a variabilidade espacial e temporal da precipitação, como é distribuída geograficamente em diferentes regiões e como as distribuições variam ao longo do tempo, enfatizando a necessidade de compreender padrões para uma gestão eficaz dos recursos hídricos.

Em termos da precisão e da confiabilidade, dos diferentes instrumentos de medição, como pluviômetros, radares meteorológicos e outros, destaca-se a necessidade de calibração e manutenção. Ao se empregar técnicas estatísticas para analisar dados de precipitação e identificar padrões, TUCCI *et al.* (2009) explicam que são analisadas as tendências para verificar a ocorrência de eventos extremos, utilizando modelos hidrológicos para simular o seu comportamento em resposta à precipitação, permitindo previsões e avaliações de cenários futuros.

Outro aspecto importante, discutido por Paca *et al.* (2020), Wanderley, Amorim e Carvalho (2012) e Wanderley, Amorim e Carvalho (2014), é a utilização de dados espaciais para melhor configurar as distribuições em torno da bacia de estudo. Quando analisadas essas aplicações, é possível verificar os melhores valores para os dados, especialmente considerando que com a utilização de estações pluviométricas (Figura 3) muitas áreas não apresentam valores de precipitação, devida à ausência de pluviômetros. Para tal, é empregado o método de Thiessen, que ajusta polígonos para determinar áreas de influência dentro do local de estudo, por meio de uma interpolação entre as estações encontradas na área de estudo. Essa técnica é estruturada de acordo com o uso e ambientação de instrumentos disponibilizados, sendo apropriado quando a distribuição dos postos pluviométricos dentro da bacia hidrográfica não é uniforme. Desenvolvendo uma atribuição de pesos aos totais precipitados medidos em cada posto pluviométrico, com esses pesos proporcionais à área de influência de cada posto (GOMIG *et al.*, 2007).

Figura 3 – Modelo de estação meteorológica do INMET



Fonte: Sentelhas e Caramori (2002).

O Sensoriamento Remoto é uma das implementações mais importantes e confiáveis para que se possa analisar espacialmente diferentes regiões. Ao longo dos anos, foram elaborados diferentes softwares e técnicas que realizam o tratamento desses dados, com análises multi-espectrais e meteorológicas, que possuem variações temporais diversas (YE, 2022). Uma alternativa para incorporação de dados de precipitação, é utilizar informações de pontos de grade, obtidas de fontes como radares meteorológicos e satélites. Com isso, Rasera *et al.* (2023) corroboram que o Brazilian Daily Weather Gridded Data (BR-DWGD) é uma valiosa fonte de dados de precipitação, abrangendo todo o Brasil, com alta resolução espacial (10 km). Para tal, são aplicadas técnicas em dados de estações meteorológicas e pluviômetros, com variação temporal diária, apresentando precipitação em grade e implementando tendências climáticas, por monitoramento de secas, através de cálculos de índices de precipitação (XAVIER *et al.*, 2022). Essa abordagem proporciona detalhes espaciais refinados, minimiza o viés (erro sistemático) e oferece uma série de dados de longo prazo, conforme ressaltado por Funk *et al.* (2015). O CHIRPS é outro conjunto de dados de precipitação de alta resolução desenvolvido pelo Climate Hazards Group. Ao contrário do BR-DWGD, a precipitação é estimada para uma maior parcela do globo terrestre, com resolução espacial de 5 km.

3.2.2 Vazão

A vazão de um rio é uma medida que indica a quantidade de água que passa por um determinado ponto em um intervalo de tempo específico. Ela é necessária para entender a dinâmica dos rios e sua variedade nas aplicações, como monitoramento de recursos hídricos, gestão de água, prevenção de enchentes e planejamento hidrelétrico (LASTRADA; COBOS; TORRIJO, 2020).

Essas representações podem variar significativamente ao longo do tempo, dependendo das condições climáticas, sazonalidade e atividades humanas na bacia hidrográfica. O conhecimento da vazão de um rio é fundamental para o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos e para a proteção do meio ambiente (JAIN; SINGH, 2023). Na bacia do rio Ibirapuitã é encontrada a estação 76750000, que realiza as medidas de vazões no município de Alegrete e às disponibiliza na plataforma HIDROWEB, que é gerenciada pela ANA, apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Instrumento fluviométrico da cidade de Alegrete-RS



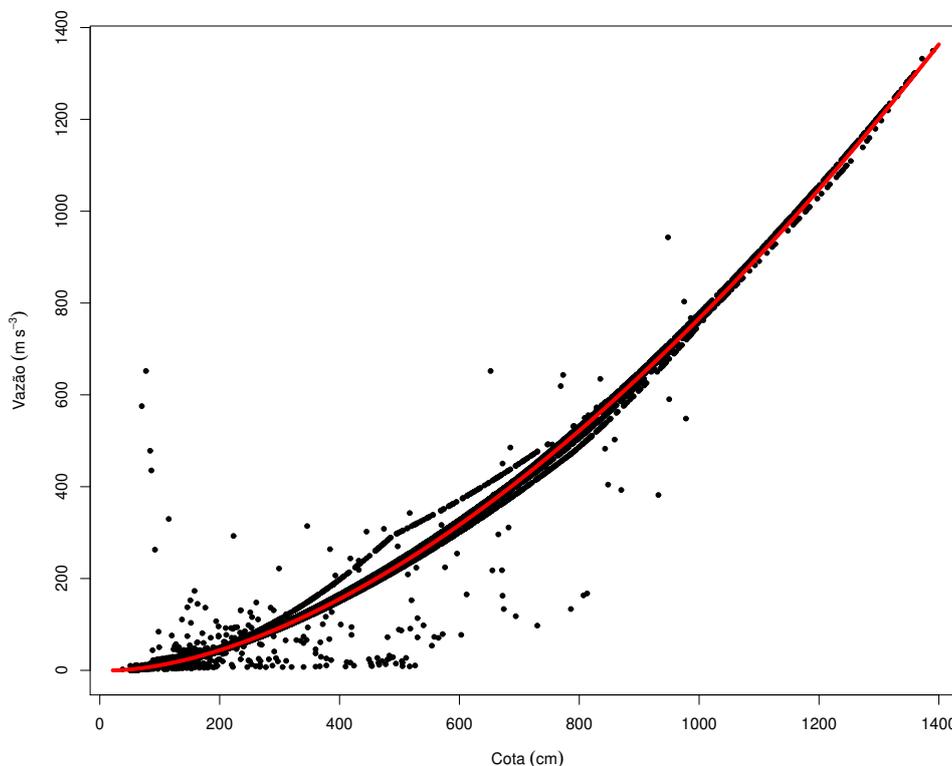
Fonte: SGB (2022).

Em torno do que foi proposto, esses valores são determinados através de uma curva-chave (Figura 5), dada por uma função matemática que ajusta a relação entre a cota observa e a vazão, levando em conta as características geométricas e hidráulicas da seção transversal do curso de água considerado, demonstrado pela seguinte equação (JACCON, 1989):

$$Q = a \left(\frac{h}{100} - h_0 \right)^n, \quad (3.1)$$

sendo Q a vazão (m^3/s), h a leitura da régua (nível do rio, em centímetros), a , h_0 e n os parâmetros chave para a seção. Tais parâmetros diferenciam em torno das estruturas apresentadas na seção transversal da área de estudo.

Figura 5 – Curva-chave para a bacia do Ibirapuitã



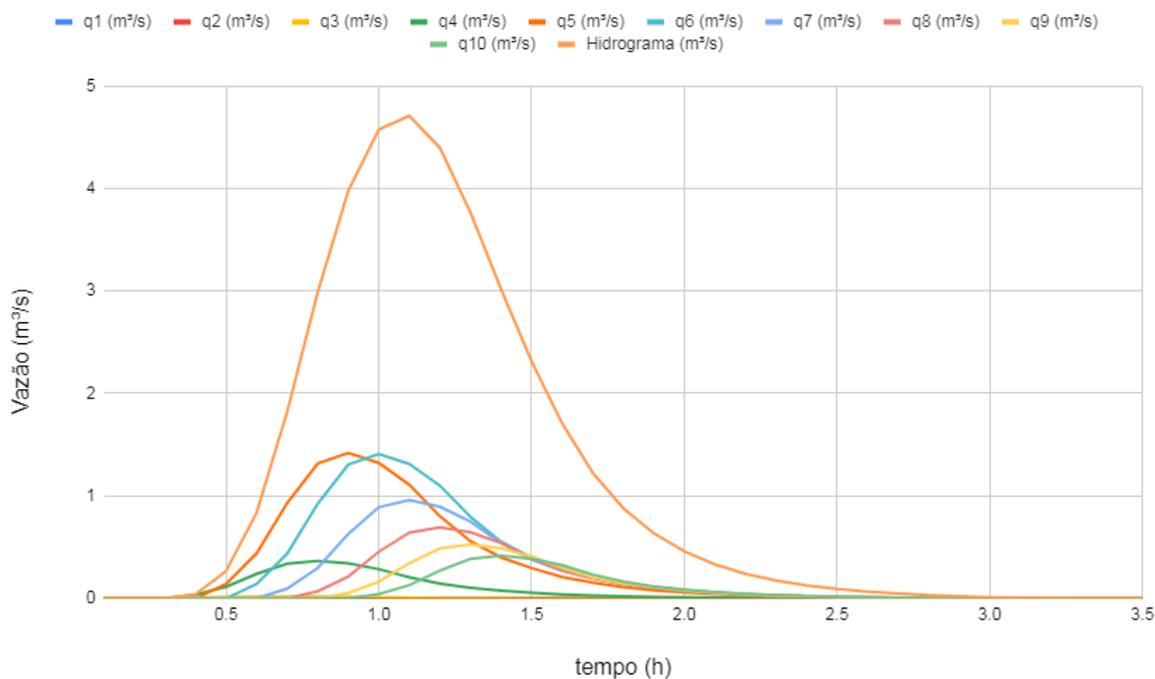
Fonte: Autor (2024). A partir dos dados de ANA (2023b).

3.2.2.1 Hidrograma de projeto

O hidrograma de projeto (ou hidrograma unitário) é uma representação gráfica do comportamento esperado da vazão de um rio ao longo do tempo em resposta a uma determinada precipitação projetada (Figura 6). Podendo ser uma ferramenta fundamental no projeto de infraestruturas hidráulicas, como sistemas de drenagem urbana, canais, barragens e estações de tratamento de água (BUCHIANERI, 2004). Assim, é gerada uma ferramenta importante para dimensionar infraestruturas hidráulicas e avaliar seu desempenho sob condições extremas de precipitação. Sendo utilizado para garantir que as estruturas projetadas possam lidar adequadamente com eventos de enchentes esperados, minimizando os riscos de danos às propriedades e à segurança pública (ANDRIEU; MOUSSA; KIRSTETTER, 2021).

Com uma análise hidrológica da bacia hidrográfica de interesse, envolvendo a coleta e análise de dados históricos de precipitação, vazão e outras variáveis relevantes, bem como a identificação de padrões climáticos e hidrológicos. A precipitação estimada é então convertida em uma estimativa de vazão de entrada nos cursos d'água da bacia hidrográfica (URBANI; GRACIOSA; BRAMBILA, 2023). Que pode ser feita utilizando modelos hidrológicos, que consideram as características físicas da bacia, como tamanho, topografia, uso do solo e condições de escoamento.

Figura 6 – Hidrograma de projeto



Fonte: Siebra (2020)

3.3 Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System

O HEC-HMS é uma ferramenta computacional desenvolvida pelo *US Army Corps of Engineer*, para simulação dos processos hidrológicos completos de sistemas de uma ou mais bacias. Entre as aplicações do HEC-HMS estão a previsão de inundações, o planejamento de infraestrutura hídrica, a gestão de recursos hídricos, entre outros processos.

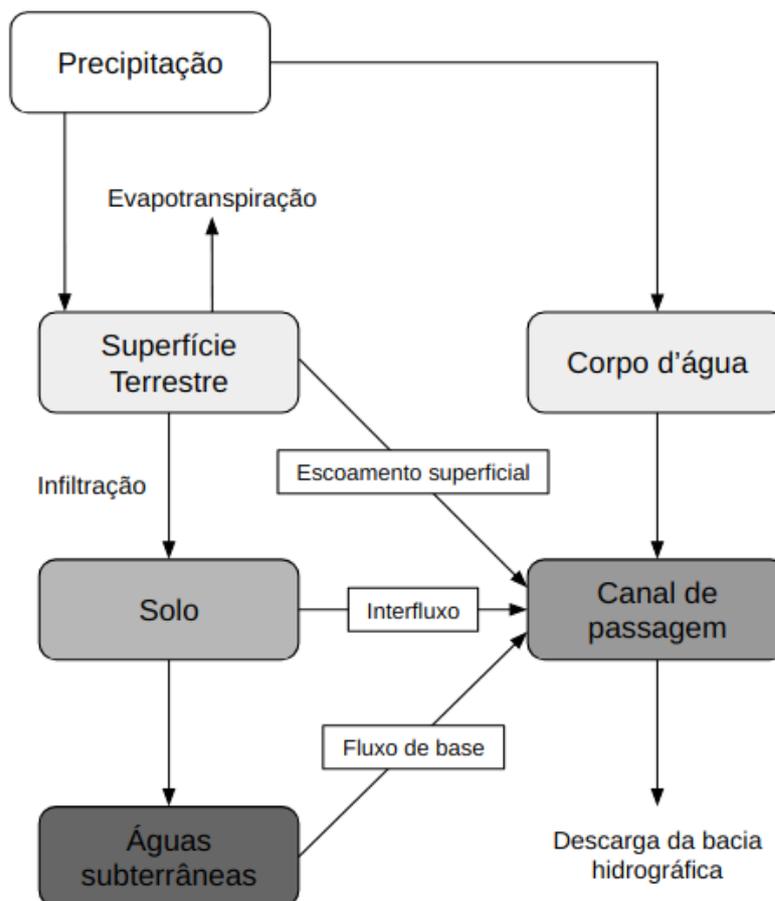
Dentro do modelo hidrológico, qualquer bacia hidrográfica pode ser dividida em elementos que representam as características físicas. Estes parâmetros, no manual da USACE (2015), são definidos como:

- **Sub-bacia:** é uma área menor dentro de uma área de drenagem geral (bacia) que será delimitada para uma análise hidrológica. As sub-bacias são utilizadas para dividir a bacia em seções gerenciáveis.
- **Trecho:** É um segmento ou seção específica de um rio ou canal dentro de uma sub-bacia. Onde cada trecho tem suas próprias características físicas.
- **Junção:** É o ponto onde dois ou mais trechos ou sub-bacias se encontram.

Os processos de escoamento de água para uma bacia hidrográfica, que podem ser simulados, são representados de forma simplificada no diagrama apresentado na Figura 7. A dinâmica de uma bacia hidrográfica é extremamente influenciada pela

precipitação que ocorre na área de drenagem da bacia e pelos seus processos de evapotranspiração. A precipitação desempenha um papel fundamental, uma vez que parte dela é convertida diretamente em vazão nos modelos hidrológicos, pode ser incorporada ao modelo de diferentes maneiras, sendo uma delas a inclusão de dados pontuais, e a outra de dados espaciais.

Figura 7 – Processos hidrológicos que podem ser simulados no HEC-HMS



Fonte: USACE (2015).

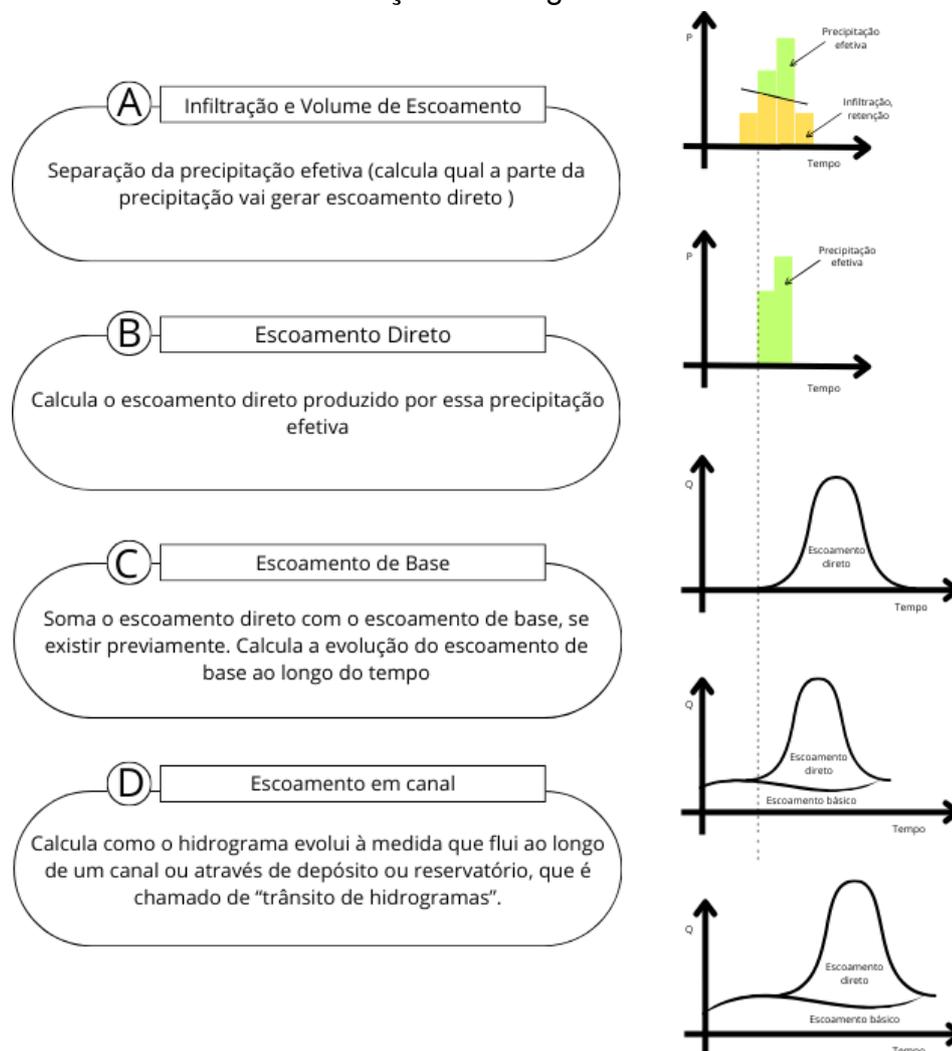
O modelo emprega modelos específicos para simular cada componente no processo de escoamento, conforme ilustrada na Figura 7. Esses modelos podem ser empíricos ou baseados em dados que utilizam relações estatísticas não lineares entre dados de entrada e saída para prever a vazão. São relativamente fáceis de se utilizar e, em geral, dependem de constantes e parâmetros, que nem sempre têm significado físico, mas são úteis para prever inundações e gerenciar recursos hídricos, pois podem fornecer informações sobre a quantidade de água em uma determinada bacia hidrográfica, possuindo resposta à uma quantidade específica de chuva (FRANCHINI; PACCIANI, 1991).

Os componentes do processo de escoamento no HEC-HMS, organizados pelo USACE (2015), apresentam a seguinte divisão:

1. **Infiltração e Volume de Escoamento:** são fundamentais para determinar a quantidade de água que contribui efetivamente para o escoamento, levando em conta as perdas associadas a fenômenos, como interceptação pela vegetação, armazenamento temporário pelo solo, evaporação e transpiração das plantas.
2. **Escoamento Direto:** incluem tanto os efeitos do escoamento superficial quanto do escoamento subsuperficial. Eles são responsáveis por simular o processo de escoamento direto proveniente do excesso de precipitação em uma bacia hidrográfica.
3. **Escoamento de Base:** analisa a contribuição lenta e contínua de água para rios e riachos a partir de fontes subterrâneas, como aquíferos. Esse modelo fornece um fluxo de base consistente e contínuo, mesmo durante períodos de estiagem, para que a vazão no leito não seja igual a zero.
4. **Escoamento em Canal:** modelo responsável por simular o comportamento do fluxo de água em canais naturais ou artificiais, como rios, riachos ou canais de irrigação. Esses modelos são usados para estudar e prever como a água se move ao longo desses cursos d'água, levando em consideração fatores como a topografia do terreno e as características do canal.

O papel detalhado de cada um dos modelos mencionados anteriormente, necessários em uma simulação hidrológica, estão representados esquematicamente no fluxograma apresentado (Figura 8).

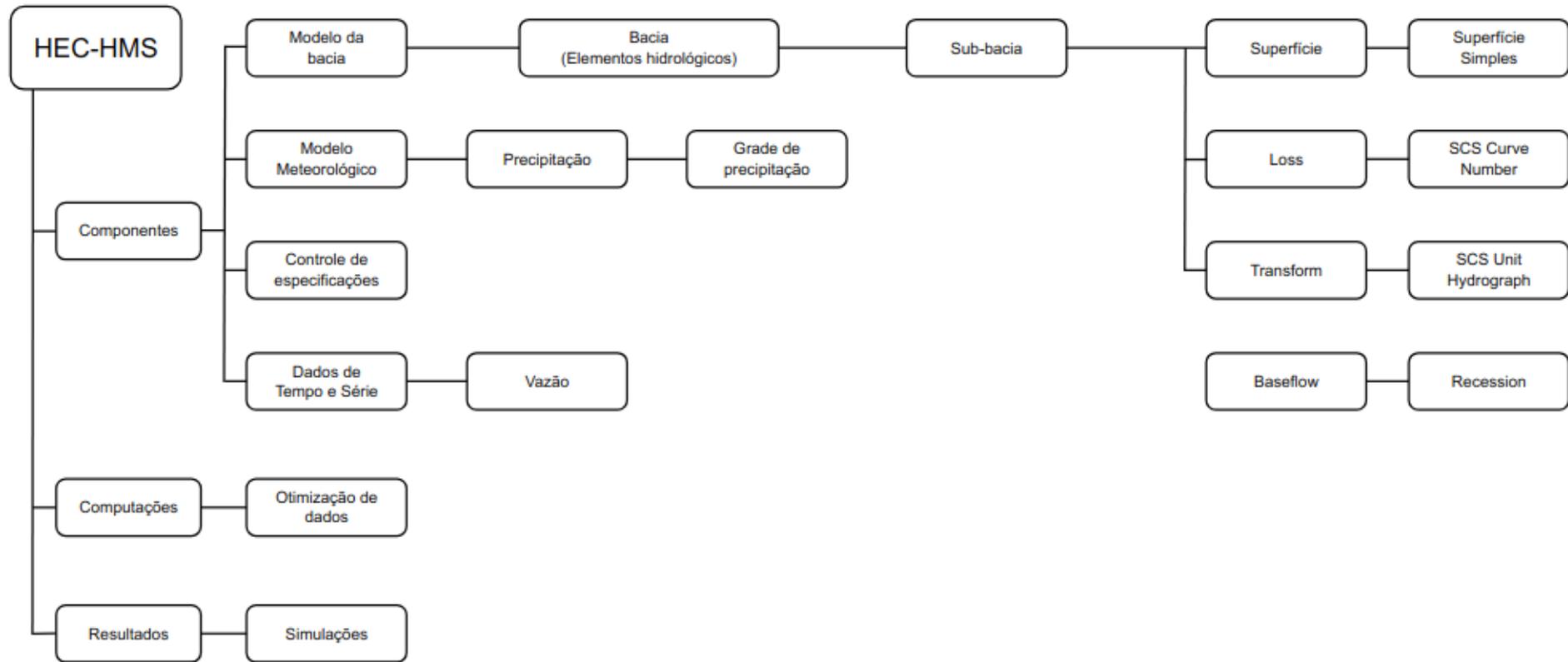
Figura 8 – Interpretação física de cada uma das componentes presentes em uma simulação hidrológica com HEC-HMS



Fonte: Adaptado de ALVES (2017).

Os métodos utilizados no modelo são informados na Figura 9, proporcionando uma compreensão abrangente do processo. Assim, são destacados os passos para a modelagem hidrológica na bacia do rio Ibirapuitã, especificamente no contexto do município de Alegrete-RS. A visualização gráfica permite uma análise minuciosa dos segmentos essenciais necessários para uma aplicação bem-sucedida da modelagem. Dessa forma, é possível verificar claramente e concisamente o detalhamento do processo, oferecendo uma visão panorâmica dos procedimentos adotados para a modelagem hidrológica na região em questão.

Figura 9 – Processos para uma simulação hidrológica no HEC-HMS



Fonte: Autor (2024), a partir de dados do USACE (2015)

Nas próximas seções, será apresentada uma descrição detalhada dos modelos utilizados nas simulações que serão realizadas neste estudo.

3.3.1 Modelo de Infiltração e Volume de Escoamento: *Curve Number Loss Model*

Na década de 1950, o Serviço de Conservação do Solo (SCS), atualmente conhecido como Serviço de Conservação de Recursos Naturais (NRCS, na sigla em inglês) nos Estados Unidos, introduziu um método denominado "Número de Curva" (*Curve Number*), com o propósito original de avaliar a eficácia da conservação do solo e da água. Este método tornou-se um dos mais populares e amplamente utilizados para calcular o volume de escoamento proveniente de eventos extremos de precipitação (MISHRA; BABU; SINGH, 2007).

O método do SCS estima o volume de chuva que se transformou em escoamento superficial (chuva efetiva) em um determinado instante de tempo, através de um equação matemática que é dependente tanto da precipitação acumulada quanto da cobertura do solo e uso da terra,

$$P_e = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P - 0,2S) + S}, \quad (3.2)$$

onde P representa a precipitação acumulada (mm) em um dado intervalo de tempo, e S é definido como o potencial máximo de retenção de água no solo (mm). O potencial máximo de retenção representa a capacidade da bacia hidrográfica em capturar e reter a água proveniente da precipitação, e dado por:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254. \quad (3.3)$$

O CN é determinado para uma bacia hidrográfica específica com base em fatores como a classificação hidrológica do solo, o tipo de uso e as condições de umidade anteriores. Os valores são tabelados, e originalmente publicados pelo SCS, e obtidos experimentalmente a partir de dados provenientes de solos dos Estados Unidos. Ao longo dos anos, vários autores adaptaram essas tabelas para diferentes regiões em todo o mundo. Essas tabelas desempenham um papel crucial na aplicação do método, pois os valores do CN podem variar de 100 (para corpos d'água) a aproximadamente 30 para solos permeáveis com altas taxas de infiltração.

Outro dado importante, que é oriundo da interceptação, armazenamento ou infiltração, é a Abstração Inicial (I_a), que determina a parcela que deve ser descontada da chuva total previamente à transformação em chuva efetiva, apresentada pela seguinte equação:

$$I_a = 0,2.S, \quad (3.4)$$

que é 20% do potencial máximo de retenção de água no solo. Esse valor implica qual é a quantidade da precipitação que dispersa até a geração do escoamento superficial, por infiltração de água no solo, que pode ser armazenada na superfície ou retenção da vegetação.

O SCS classifica os solos em quatro grupos hidrológicos (A, B, C e D) com base na capacidade de infiltração da água. Essa classificação é crucial para orientar práticas de conservação e gestão de água e solo. De acordo com Sartori, Lombardi e Genovez (2005) e Anjinho *et al.* (2018), as classes hidrológicas dos solos brasileiros, são classificadas de acordo com o grau de resistência oferecido pelo solo à erosão.

Dentro dessas categorias, o Grupo A é conhecido por sua microporosidade e predominância de texturas argilosas e/ou muito argilosas. Esses solos se destacam por sua notável capacidade de retenção de água, graças à sua estrutura porosa. Além disso, alguns solos nesse grupo podem apresentar textura média e não possuir horizontes superficiais arenosos (SARTORI; LOMBARDI; GENOVEZ, 2005).

Por sua vez, o Grupo B é composto por solos com texturas médias e, em alguns casos, horizontes superficiais arenosos em cada tipo de solo. Que exibem uma ampla variedade de características físicas e químicas, variando de areno-argilosos e influenciando a drenagem e a capacidade de retenção de água, o que tem impacto em suas potenciais aplicações na agricultura e outras atividades (SARTORI; LOMBARDI; GENOVEZ, 2005).

No Grupo C, encontram-se solos que geralmente não apresentam transições texturais abruptas. Isso significa que a mudança na textura do solo ocorre de maneira gradual à medida que se aprofunda. Esses solos variam em profundidade e composição, mas não exibem mudanças texturais bruscas ao longo de seu perfil. Essa característica tem implicações significativas para o desenvolvimento da vegetação e o uso da terra nessas áreas (SARTORI; LOMBARDI; GENOVEZ, 2005).

Por fim, o Grupo D é uma categoria diversificada que engloba vários tipos de solos e características geológicas, como afloramentos rochosos. Essa categoria inclui uma ampla variedade de solos com propriedades físicas e químicas muito diferentes, tornando-a altamente heterogênea em termos de suas características (SARTORI; LOMBARDI; GENOVEZ, 2005).

Os valores de CN para diferentes grupos hidrológicos dos solos do Brasil são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Grupos hidrológicos para o *Curve Number* (CN)

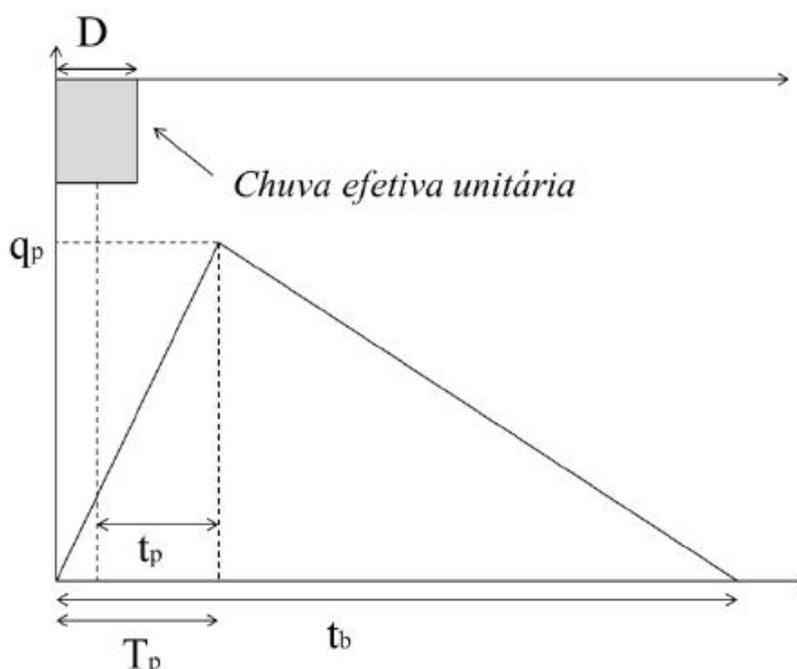
Tipo de uso	Tipo de solo				Fonte
	A	B	C	D	
Água	100				Soares <i>et al.</i> (2017)
Agricultura	62	71	78	81	Soares <i>et al.</i> (2017)
Área Urbanizada	77	85	92	92	Soares <i>et al.</i> (2017)
Formação florestal	26	52	62	69	Santos e Lollo (2016)
Formação campestre	56	75	86	91	Santos e Lollo (2016)
Solo Exposto	72	82	87	89	Rezende, Ribeiro e Mendes (2018)

Fonte: Anjinho *et al.* (2018)

3.3.2 Modelo de Escoamento direto: *SCS Unit Hydrograph*

O modelo de hidrograma unitário foi desenvolvido pelo Serviço de Conservação de Solos dos Estados Unidos (atualmente NRCS - National Resources Conservation Service) e implica em um modelo empírico que fornece um hidrograma unitário adimensional para uma precipitação efetiva de 1 mm em uma bacia hidrográfica. Esse modelo é amplamente utilizado em bacias hidrográficas não instrumentadas para estimar hidrogramas de cheia e caudais máximos (Figura 10).

Figura 10 – Hidrograma unitário triangular SCS



Fonte: Siebra (2020)

O hidrograma unitário SCS é obtido por meio de uma série de equações que levam em consideração as características do solo, da vegetação e da topografia da bacia hidrográfica. Essa ferramenta desempenha um papel fundamental na hidrologia,

uma vez que representa a resposta da bacia hidrográfica a uma chuva efetiva unitária, sendo essencial para a previsão de cheias e para o planejamento e gestão de recursos hídricos (GARAY; GOYENECHE; SOTO, 2019).

O hidrograma unitário é, normalmente, definido como uma função em intervalos de tempo. A vazão em um intervalo de tempo t é calculada a partir da convolução entre as funções P_{ef} (chuva efetiva) e k (ordenadas do hidrograma unitário discreto):

$$Q_t = \sum_{i=t}^t P_e b_{t-i+1} \quad \text{para } t < k \quad (3.5)$$

$$Q_t = \sum_{i=t-k+1}^t P_e b_{t-i+1} \quad \text{para } t \geq k. \quad (3.6)$$

onde, Q_t é a vazão do escoamento superficial no intervalo de tempo t ; b é a vazão por unidade de chuva efetiva do hidrograma unitário; P_e é a precipitação efetiva do bloco i ; k é o número de ordenadas do hidrograma unitário.

3.4 Índices climatológicos

A Equipe de Especialistas em Detecção e Índices de Mudanças Climáticas (*Expert Team of Climate Change Detection Indices - ETCCDI*, Peterson et al., 2001) desenvolveu uma série de índices que desempenham um papel fundamental na detecção de eventos climáticos extremos. Com isso, alguns podem ser apresentados, como o índice de extremos absolutos, que representa os valores máximos de precipitação, o índice de limiar baseados em percentil (não fixos), definido como o valor de precipitação acima dos limites percentuais fixos e o índice baseado na duração, que caracteriza períodos consecutivos excessivamente úmidos.

O índice $RX1day$ é definido como a precipitação acumulada máxima ao longo de um dia durante um respectivo período,

$$RX1day_j = \max(Pr_{ij}), \quad (3.7)$$

onde Pr_{ij} é a precipitação acumulada no dia i dentro de um período j .

Por outro lado, o índice $RX5day$ é definido como a máxima precipitação acumulada em 5 dias consecutivos durante um respectivo período,

$$RX5day_j = \max(Pr_{kj}), \quad (3.8)$$

onde Pr_{kj} é a precipitação acumulada durante um intervalo de 5 dias consecutivos dentro de um período j .

O índice $R95p$ é definido como o limiar da precipitação diária que excede o percentil 95, considerando apenas os dias em que a precipitação diária foi superior a 1

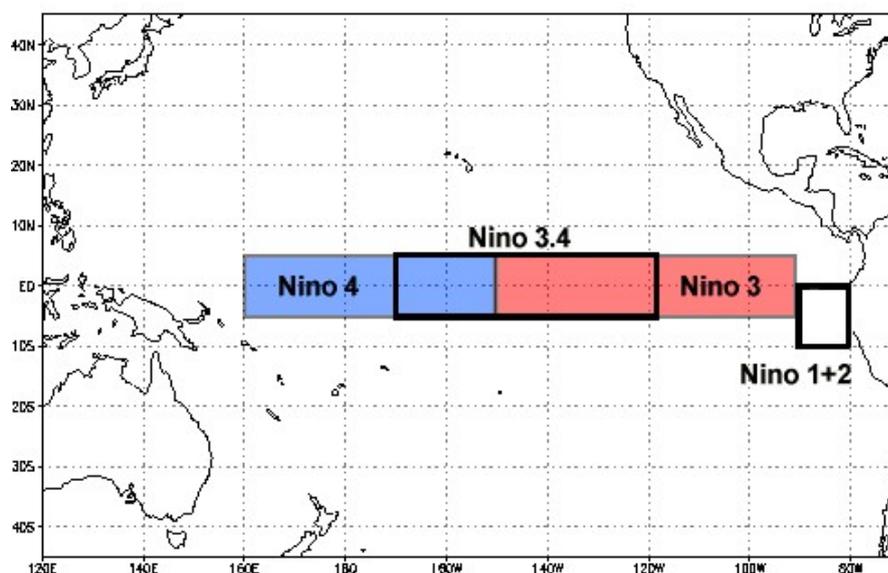
mm. Na literatura, o R95p é amplamente utilizado para identificar eventos extremos diários de precipitação. Já o índice R99p é definido como o limiar da precipitação diária que excede o percentil 99, considerando apenas os dias em que a precipitação diária foi superior a 1 mm. Já o R99p é amplamente utilizado para identificar eventos extremamente intensos.

3.4.1 *El Niño-Southern Oscillation*

Dentro dos diferentes fenômenos climáticos, está destacado o ENSO, que causa decorrentes eventos de estiagem e a predominância de frequentes inundações nas regiões norte e sul do Brasil. Essa conformidade das trocas de temperatura do mar é explicada por Cai *et al.* (2020) como sendo um evento que apresenta uma marcada simetria e está relacionado com a capacidade que as anomalias tem para empurrar a TSM quente e fria acima, na convecção limite. Essas ocorrências climáticas tendem a causar no período El Niño maiores precipitações na região sul, e eventos de seca na porção norte, o que difere no período do fenômeno La Niña, que causa seca no sul e precipitação no norte do país (HIERA, 2016).

Alguns lugares do Brasil estão relacionados à Multivariate Index Nino (Figura 11), que juntas efetuam uma oscilação sul, por efeitos encontrados nas quatro regiões da ENSO sobre a superfície do mar, acarretando alterações na ocorrência de secas ou aumento de precipitações entre os meses de dezembro, janeiro e fevereiro, que podem provocar problemas após esses picos de oscilações dos fenômenos (FILHO *et al.*, 2020). Em estudos realizados, historicamente, os problemas eram considerados em fatores que aplicavam apenas ao fenômeno El Niño, pela sua grande ocorrência em episódios com maior degradação através de grandes precipitações e por severas condições climáticas, sendo estudada a conjunção dos dois eventos a partir do ano de 1980 (OKUMURA; DESER, 2010).

Figura 11 – Regiões da ENOS sobre o Oceano Pacífico Equatorial



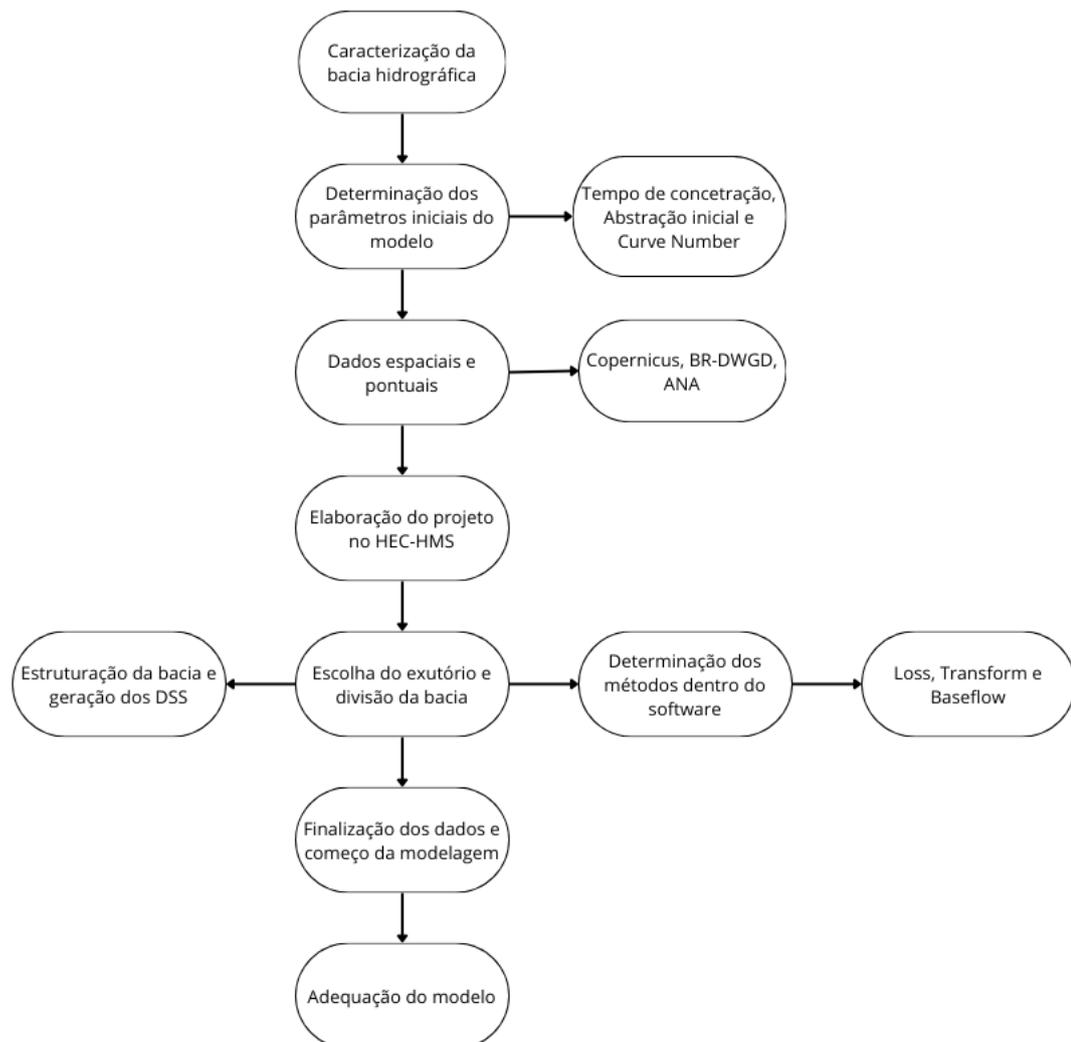
Fonte: Siebra (2020)

Essas anomalias seguem seus fatores e podem ser somadas com outras que ocorrem na atmosfera, orientando que riscos gerados pelo gradiente das regiões da ENSO são efetuados em determinados intervalos de tempo, causando maiores intensidades na ocorrência de precipitações que provocam cheias em alguns locais brasileiros. E quando são comparadas essas temperaturas, é notado um aumento na temperatura média do mar, ocasionando episódios mais chuvosos no intervalo de ocorrência do fenômeno El Niño, que diferenciam da temperatura média mais fria do mar, que efetua eventos de estiagem e secas no fenômeno La Niña (CAI *et al.*, 2021).

4 METODOLOGIA

A Figura 12 ilustra a divisão e as etapas empregadas, fornecendo uma visão geral dos métodos adotados.

Figura 12 – Fluxograma metodológico

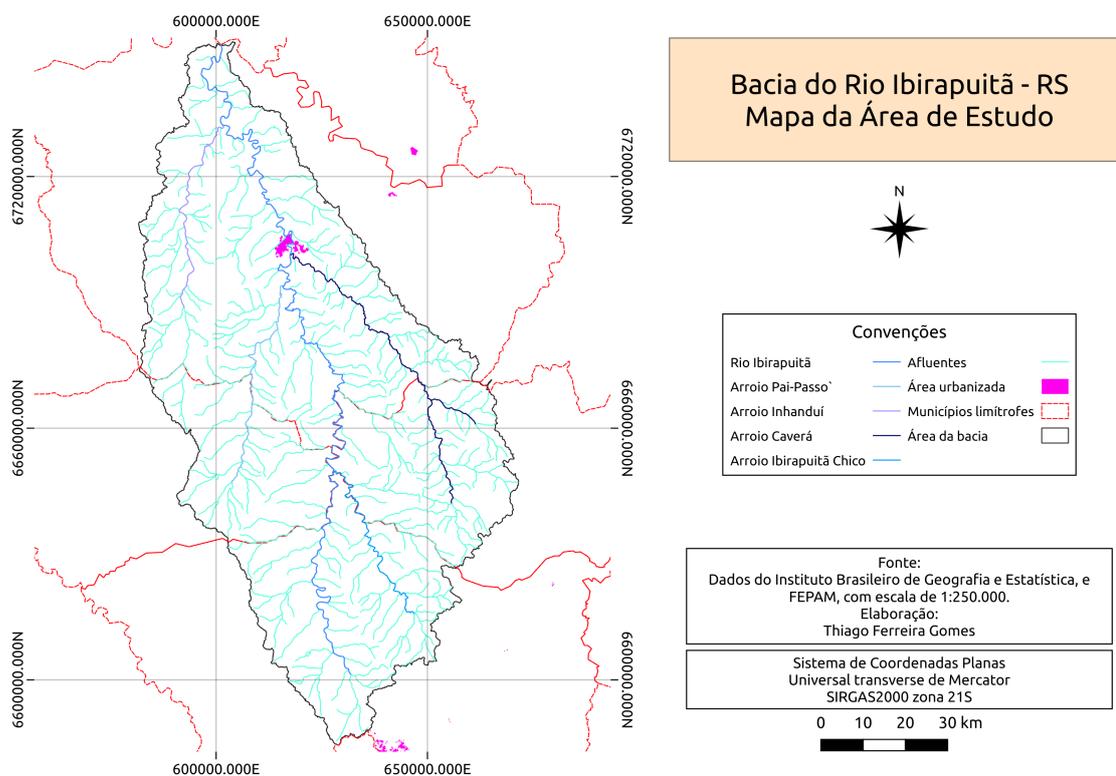


Fonte: Autor (2024).

4.1 Área de estudo

A bacia do rio Ibirapuitã (Figura 13), localizada na região hidrográfica da bacia do Rio Uruguai, que apresenta no seu limite quatro municípios, estando em seu nível mais alto o limite político do município de Sant'Ana do Livramento em relação aos demais, passando entre os municípios de Rosário do Sul e Quaraí, seguindo o curso passando pela zona urbana do município de Alegrete e desaguando no Rio Ibicuí, com uma área total de aproximadamente 7.973,79 km² (IBGE, 2021).

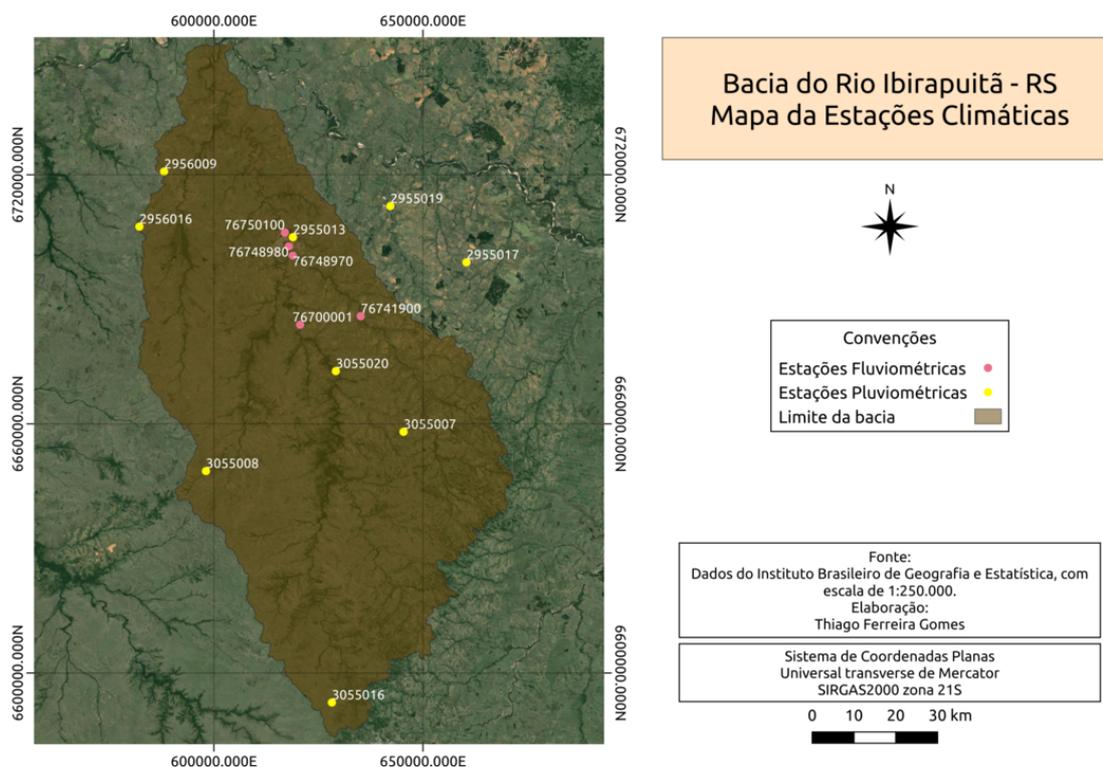
Figura 13 – Localização da área de estudo



Fonte: Autor (2024).

Após processamento no HEC-HMS e com o auxílio das nomenclaturas do IBGE (2021), determinou-se uma área de aproximadamente 5.829,20 km² para as simulações (Figura 19), excluindo a região mais ao norte da bacia, que está localizada após a estação fluviométrica. A Figura 14 apresenta todas as estações pluviométricas e fluviométricas instaladas na área da bacia. Os dados de vazão são coletados próximo à área urbana do município de Alegrete-RS desde 01 de Janeiro de 1942 até os dias atuais, passando pelo canal do rio.

Figura 14 – Estações da ANA na bacia do rio Ibirapuitã



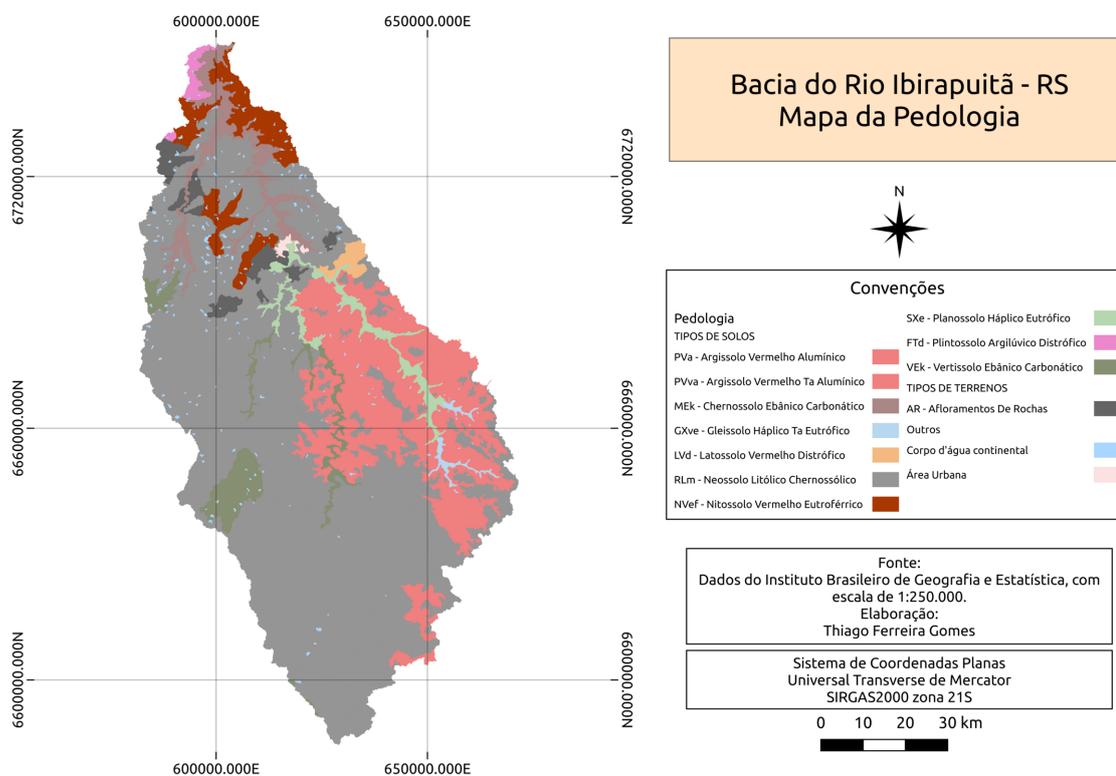
Fonte: Autor (2024).

4.1.1 Pedologia

No estado do Rio Grande do Sul, podem ser identificadas 13 formações pedológicas, que apresentam subclasses. Essas subclasses são caracterizadas por composições físicas e químicas específicas que se desenvolveram ao longo de intervalos de tempo distintos (OLIVEIRA, 2008).

De acordo com os dados fornecidos pelo IBGE (Figura 15), a bacia do rio Ibirapuitã é composta por nove formações, que incluem o Argissolo Vermelho Alumínico, Argissolo Vermelho Ta Alumínico, Chernossolo Ebânico Carbonático, Gleissolo Háplico Ta Eutrófico, Latossolo Vermelho Distrófico, Neossolo Litólico Chernossólico, Nitossolo Vermelho Eutrófico, Planossolo Háplico Eutrófico, Plintossolo Argulúvico Distrófico e Vertissolo Ebânico Carbonático (IBGE, 2021). Essas distintas pedologias desempenham um papel fundamental na caracterização da região e influenciam uma variedade de fatores ambientais e agrícolas.

Figura 15 – Tipos pedológicos da bacia do rio Ibirapuitã



Fonte: Autor (2024).

Na configuração dos grupos hidrológicos, procedeu-se à estruturação de cada tipo de solo, analisando a distribuição de cada formação dentro dos grupos hidrológicos pertinentes. Este processo foi feito utilizando o software QGis, empregando os recursos dos Sistemas de Informações Georreferenciadas (SIG), conforme as orientações e apresentações fornecidas por Anjinho *et al.* (2018). das relações entre os diferentes tipos de solo e os respectivos grupos hidrológicos.

Classificando dos solos em um processo complexo, que utiliza um sistema bem estruturado, denominado Taxonomia do Solo, também conhecida como *Soil Taxonomy*. Este sistema leva em consideração uma série de propriedades do solo e sua organização hierárquica para categorizá-los de maneira precisa. Por meio dessa abordagem, é possível determinar não apenas a composição e estrutura do solo, mas também entender sua formação e evolução ao longo do tempo. Ao analisar diferentes características como textura, cor, estrutura e composição química, a Taxonomia do Solo proporciona "*insights*" valiosos sobre a diversidade e a dinâmica dos solos em diversos ambientes (BRADY; WEIL, 2013).

Esses tipos de solos são comuns em regiões tropicais ou subtropicais, onde as chuvas são frequentemente intensas. Eles são amplamente utilizados na agricultura, mas exigem cuidados específicos para evitar erosão e degradação do solo. Devido a fatores como lixiviação e chuvas moderadas, esses solos são vulneráveis e precisam de técnicas de conservação, como plantio direto, rotação de culturas e adição de matéria

orgânica.

Embora sejam frequentemente usados na agricultura, podem sofrer erosão se não forem manejados adequadamente, portanto, é crucial implementar práticas de conservação para preservá-los a longo prazo. E todas as formações presentes, no horizonte B, são sobrepostas por uma camada mais clara e menos fértil, cujas características variam conforme a presença de argila e outros minerais (STRECK *et al.*, 2008).

4.1.2 Uso e Ocupação do Solo

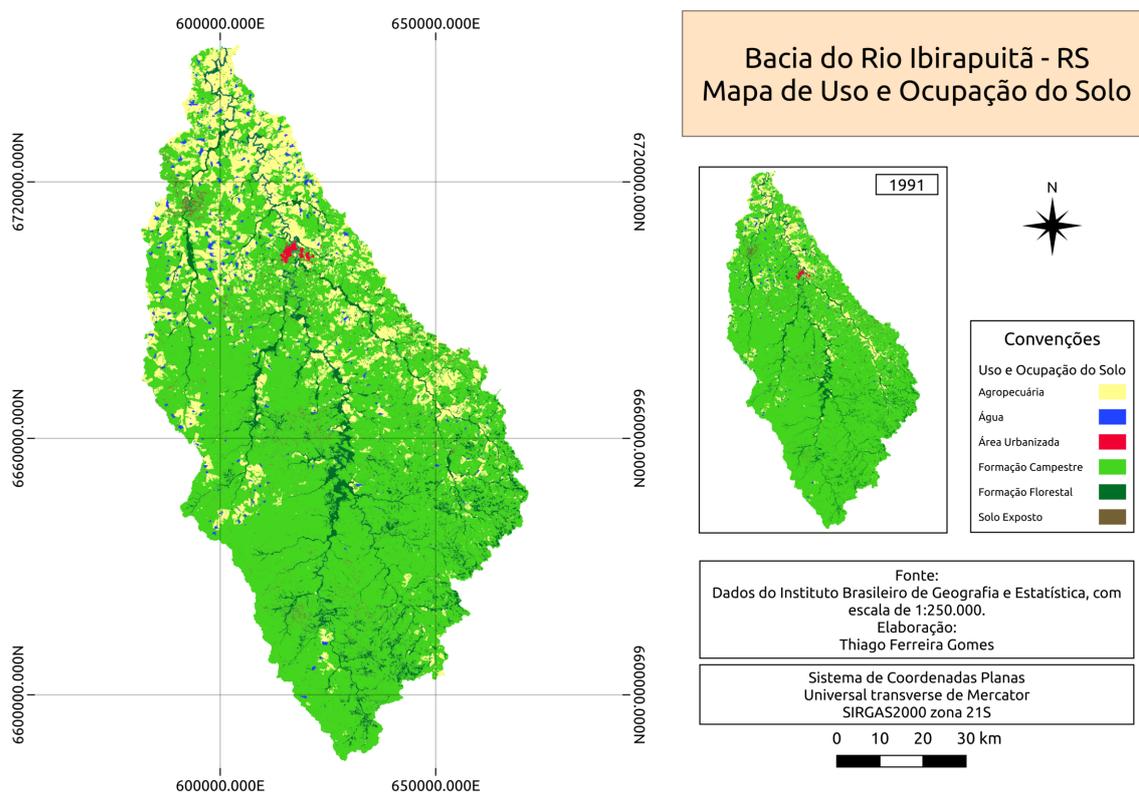
O MapBiomas é uma ferramenta utilizada na compreensão do panorama do uso e ocupação do solo no Brasil. Sua abordagem colaborativa, que combina dados de sensoriamento remoto e inteligência artificial, proporcionam uma visão abrangente das transformações territoriais ao longo do tempo. Esse mapeamento detalhado tem implicações significativas para o planejamento urbano, orientando as autoridades na expansão sustentável das cidades e na preservação de áreas verdes essenciais. Além disso, contribui para a mitigação de inundações, o que pode ter um impacto positivo na gestão dos recursos hídricos (AMARAL; COELHO; VIEIRA, 2022).

O projeto tem como objetivo o mapeamento anual da cobertura e do uso da terra em todo o território nacional, abrangendo biomas, estados e municípios do Brasil. A plataforma oferece acesso a dados e imagens que cobrem todas as regiões do Brasil, desde 1985, com resultados disponíveis no final de cada ano. Os usuários podem consultar informações sobre as mudanças que ocorreram ao longo do tempo, permitindo a identificação de evoluções nas delimitações das áreas mapeadas (RODRIGUES; GOMES; CERQUEIRA, 2022).

A Figura 16 ilustra como o uso e ocupação do solo na bacia são definidos, considerando o ano de 2021. Essas informações são cruciais para estimar os valores do *CN* em estudos de hidrologia. Na Figura 17, é possível observar como o uso e ocupação do solo na bacia evoluiu nas últimas duas décadas. No entanto, mesmo com as alterações da diminuição da formação campestre para a agricultura, não se tem grandes mudanças em torno do valor de *CN*, por sofrerem essa alteração mais ao norte da bacia, não afetando sobre a área de estudo, e assim, os valores podem ser considerados constantes ao longo do período de estudo.

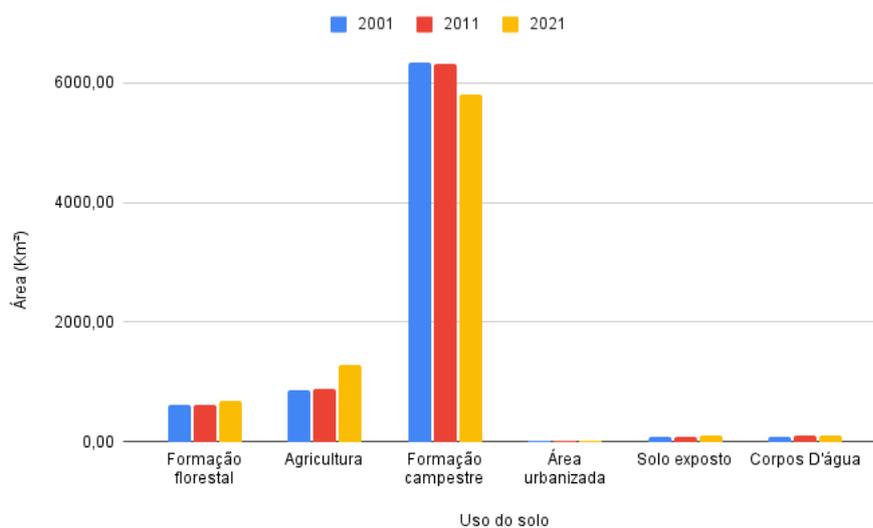
É importante ressaltar que a ausência de alterações significativas no uso e ocupação do solo na bacia podem estar relacionadas à presença da Reserva Biológica do Ibirapuitã. Essas áreas de conservação desempenham um papel vital na proteção e monitoramento da terra, contribuindo para a manutenção da integridade do solo e dos recursos naturais na bacia.

Figura 16 – Tipos de Uso e Ocupação do Solo ao ano de 2021



Fonte: Autor (2024).

Figura 17 – Diferença do Uso e Ocupação do solo nas últimas duas décadas



Fonte: Autor (2024).

4.1.3 Características do Relevo

Sob perspectivas geográficas, geológicas, hidrológicas e ambientais, o relevo exerce influência significativa em diversos processos naturais. Isso inclui o escoamento

da água, a erosão do solo, a distribuição da vegetação e vários outros aspectos relevantes para uma compreensão aprofundada da paisagem e da dinâmica ambiental na região em questão (KORMANN; ROBAINA, 2021).

De acordo com o Código Florestal (Lei nº 12.651/2012), as definições para representação do relevo em áreas rurais e urbanas são fundamentais para determinar diretrizes de uso do solo e gestão ambiental. Em áreas com declives inferiores a 2%, geralmente são encontrados terrenos planos onde os processos de acumulação predominam, facilitando atividades agrícolas. Quando a declividade varia de 2% a 5%, essas áreas ainda são propensas a acumulação, enquanto declividades de 5% a 15% sinalizam a predominância de processos erosivos, e essas áreas representam o limite para mecanização agrícola. Com declividades de 15% a 30%, é estabelecido o limite máximo para urbanização sem restrições. Já acima de 30%, ou seja, entre 30% e 47% de declividade, e em declividades superiores a 47%, as áreas são consideradas de uso restrito, conforme o Novo Código Florestal, devido à maior vulnerabilidade à erosão e outros impactos ambientais, promovendo, assim, a proteção e conservação desses territórios sensíveis. Essas diretrizes são essenciais para a gestão sustentável do território e a preservação do meio ambiente (RAJÃO *et al.*, 2021).

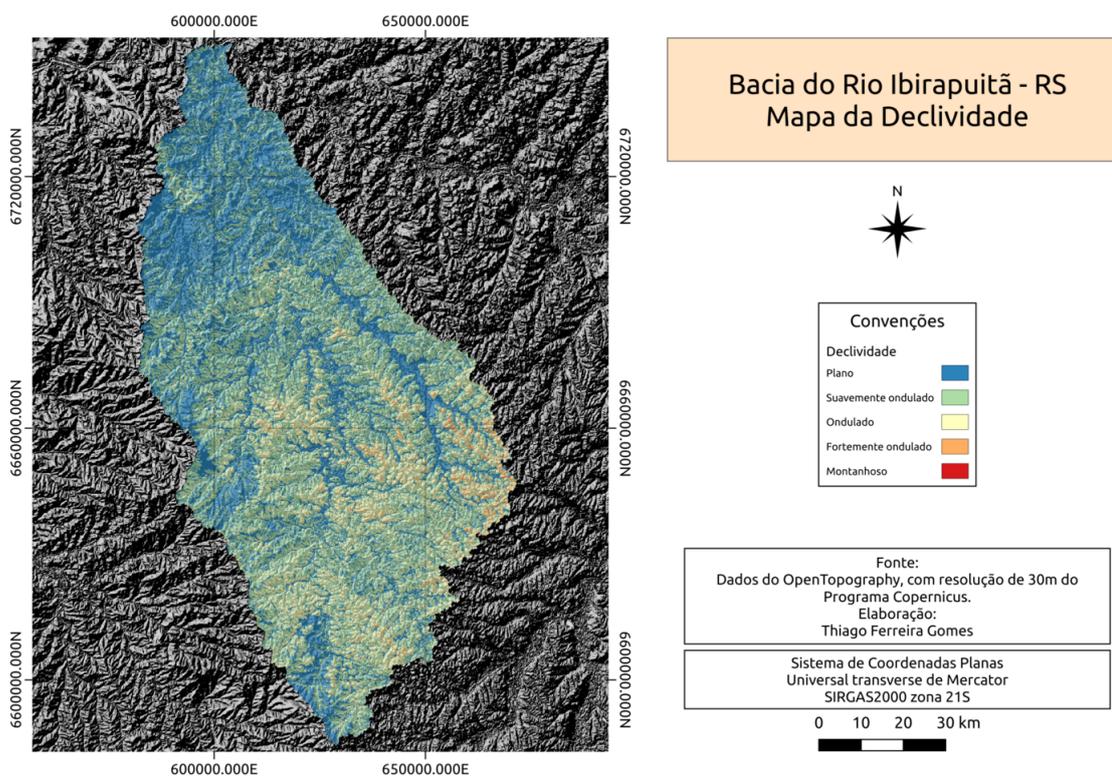
Seguindo essas informações, Menezes *et al.* (2017) explica que o relevo na bacia hidrográfica do rio Ibirapuitã é variado (Tabela 3), sendo representado na Figura 18, com áreas planas próximas às zonas de drenagem na parte inferior do rio. Na porção sul da bacia, onde se encontram as nascentes e afluentes menores, a paisagem é caracterizada por morros, conferindo uma topografia mais acidentada. No entanto, a maior parte da bacia possui declives inferiores a 15%, predominantes aqueles na faixa de 5% a 15% (MENEZES *et al.*, 2017).

Tabela 3 – Áreas da declividade da bacia do rio Ibirapuitã

Superfície	Declividade (%)
Plana	0 a 3
Suavemente ondulada	3 a 8
Ondulada	8 a 20
Fortemente ondulada	20 a 45
Montanhosa	45 a 75
Escarpado	75 a 100

Fonte: Autor (2024).

Figura 18 – Representação da declividade na bacia



Fonte: Autor (2024).

4.2 Procedimentos para o Modelo Hidrológico

4.2.1 Divisão e caracterização das Sub-bacias

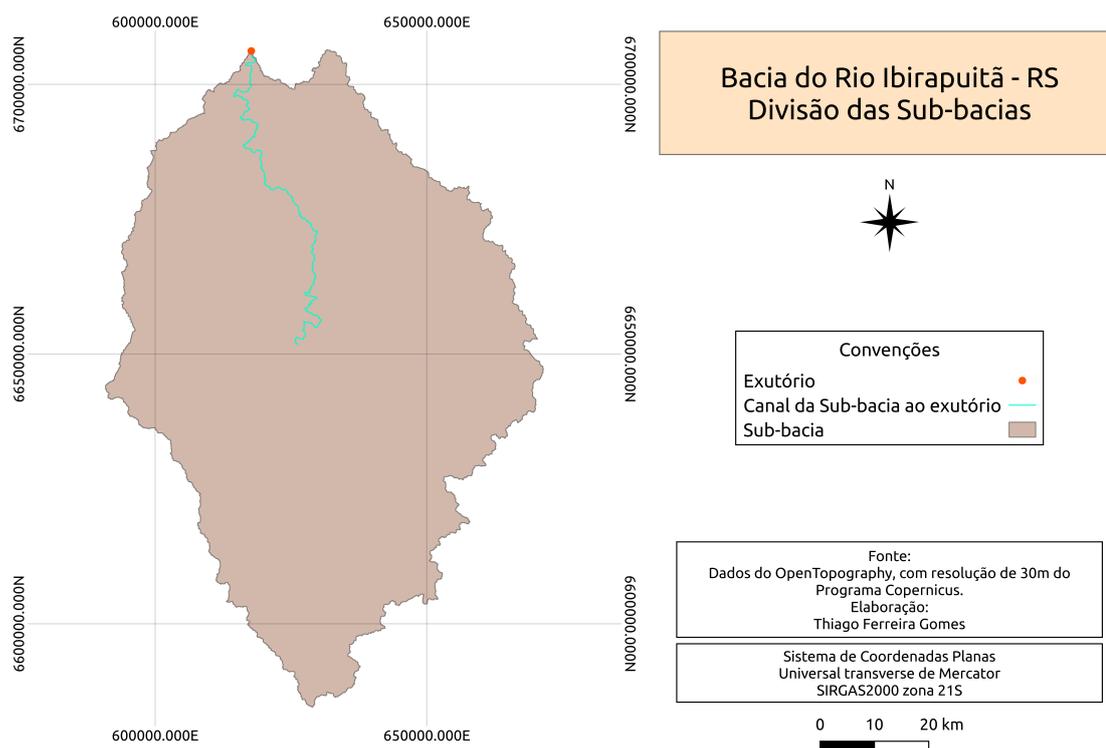
Para realizar simulações hidrológicas, são necessárias informações como características do solo, incluindo sua textura, porosidade e condutividade hidráulica, que influenciam diretamente a taxa de infiltração e, conseqüentemente, a resposta hidrológica da bacia, muitas vezes representada pelo número de curva. Além disso, é essencial fornecer parâmetros de calibração, como o tempo de atraso (pelo *Lag time*), que indica o intervalo de tempo entre a ocorrência da precipitação e o pico de vazão em determinado ponto da bacia. Outro parâmetro crítico é o tempo de recessão, que determina a velocidade com que a vazão diminui após atingir seu pico.

Ao modelar a bacia do rio Ibirapuitã, esta foi subdividida em apenas uma sub-bacia. Simulações com diferentes subdivisões foram realizadas e os resultados mostraram-se independentes do número de sub-bacias utilizadas. Essa subdivisão foi gerada adotando uma área de drenagem de 1500 km², resultando na divisão da área de escoamento superficial que chega até o exutório, localizado na área urbana do município. A Figura 19 ilustra essa divisão, estando na porção norte o instrumento responsável pela aquisição das vazões da Agência Nacional de Águas.

As condições meteorológicas associadas aos eventos extremos de precipitação

são caracterizadas pela diminuição da intensidade da radiação solar e pelo aumento da umidade relativa do ar. Conseqüentemente, há uma redução significativa na taxa de evapotranspiração, aproximando-a de valores próximos a zero, de modo que os processos de evapotranspiração possam ser desconsiderados na simulação desses eventos.

Figura 19 – Representação da sub-bacia gerada no modelo HEC-HMS até o exutório



Fonte: Autor (2024).

4.3 Aplicação dos Modelos no HEC-HMS

Através dos modelos aplicados nas simulações, Mendes (2008) classifica cada um deles da seguinte forma:

- Método de perda (*Loss*): faz uma aplicação básica para simular quanto que vai ser infiltrado, na sua forma concentrada, levando em conta o total da perda de precipitação pela infiltração. Os primeiros dados que são incorporados dentro do modelo são os da abstração inicial e dos valores de *Curve Number*. Esses, são calculados e informados para cada uma das sub-bacias após a repartição.
- Método de transformação (*Transform*): realiza uma análise do excesso de precipitação utilizando o SCS do hidrograma unitário. Apresentando o valor do "*Lag time*", que é encontrado pelo valor do Tempo de concentração, sendo

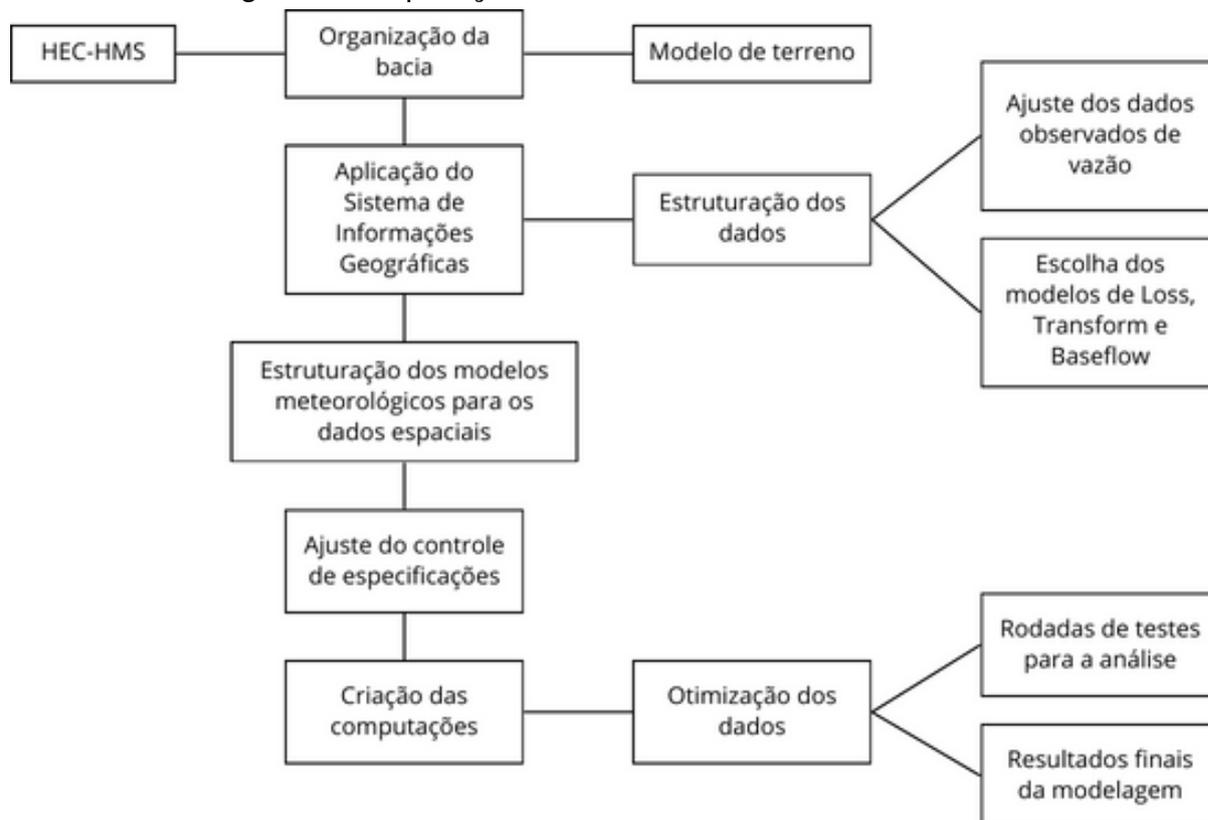
60% do mesmo. Considerando esse valor para determinar qual é o tempo de atraso até o pico da vazão.

- Método para o cálculo o fluxo-base (*Baseflow*): busca aplicar o modelo de recessão para conseguir analisar o comportamento da bacia, levando em conta o quanto a vazão inicial diminui através da descarga apresentada pela área.

A escolha dos modelos, e parâmetros adotados implicam diretamente nos processos que configuram qual o valor da vazão calculada no exutório da bacia, juntamente com os valores de precipitação. Que apresentam os valores pelo gradiente sobre a região da subdivisão da bacia, com a utilização dos dados do BR-DWGD. Adquiridos em formato NetCDF, com uma extensão de máquinas auto-descritivas, que apresentam dados por colunas. Sendo necessário realizar uma análise e transformação dos dados para DSS, que é reconhecida dentro do modelo HEC-HMS, melhorando o entendimento dessa camada apresentada. A alteração desse formato é realizada pelo próprio sistema, no qual é gerada uma separação dos dados e ambos são importados, na forma que deve se ter para a aplicação, identificando o valor da precipitação para cada pixel (10x10km) que se encontra na região. Esse modelo é importante e gera resultados para a aplicação da modelagem hidrográfica na região da bacia, principalmente para a área urbana de Alegrete.

A Figura 20 apresenta como foi estruturada a adequação dos métodos, gerenciando os locais onde os parâmetros são inseridos dentro do próprio modelo hidrológico.

Figura 20 – Aplicação dos modelos dentro do HEC-HMS



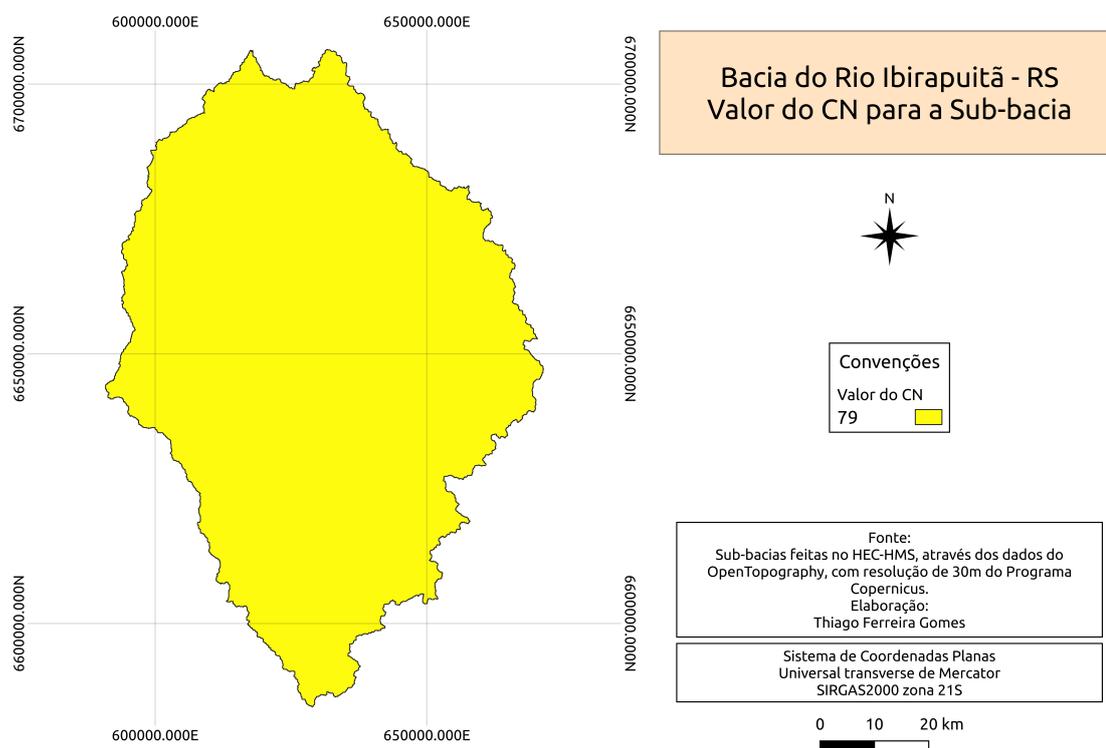
Fonte: Autor (2024).

4.3.1 Parâmetros e constantes iniciais

4.3.2 *Curve Number*

Os valores de CN foram calculados utilizando a pedologia, o uso do solo e os grupos hidrológicos correspondentes a cada tipo de solo. A Figura 21 apresenta os valores calculados, que estão de acordo com os apresentados por ANA (2023a), nos quais os valores para a região variam entre 77 e 82. Isso corrobora que o valor calculado para um CN médio de 79 está dentro dos limites para a região da bacia. O cálculo foi realizado no software QGIS (versão 3.32.2), utilizando a ferramenta de análise hidrológica do terreno disponível no System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA GIS).

Figura 21 – *Curve Number* calculado para a sub-bacia



Fonte: Autor (2024).

4.3.3 Hidrograma unitário

Em aplicações voltadas para determinar o tempo de atraso do pico de vazão, tem-se diversas aplicações, dentre elas está o SCS do Hidrograma unitário. Que é explicado por Natarajan e Radhakrishnan (2019), como um modelo que apresenta um sistema pelo tempo de atraso na ocorrência de precipitações, com um intervalo entre o pico do hidrograma e o momento em que a massa total de água passa por uma determinada localização. Essa fórmula empírica é amplamente utilizada e teve origem em 1940, com base em dados de sete pequenas bacias rurais do *Tennessee*. Isso permite um desenvolvimento da fórmula por meio da análise do cálculo do tempo de concentração.

Análises conduzidas por Cargin, Oliveira e Andrades-Filho (2023) concluíram que a equação do tempo de concentração de *Kirpich* é a mais apropriada para estudos hidrológicos. E Silveira (2019) apresenta mais duas, que antecedem a aplicação para a determinação do tempo de concentração, sendo as equações do *Corps Engineers* e *Vente Chow*. Essas equações (Tabela 4) utilizam o tempo de escoamento no comprimento do talvegue e o potencial máximo de retenção de água no solo, garantindo que não haja distorção em relação à área da bacia estudada. Além disso, as equações podem ser incorporadas ao HEC-HMS, sendo adequada para áreas de até 12.000 km², no perímetro rural.

Tabela 4 – Equações utilizadas para determinar o Tempo de concentração inicial

Autor	Equação
Corps Engineers	$T_c = 0,191L^{0,76}S_t^{-0,19}$
Ven te Chow	$T_c = 0,160L^{0,64}S_t^{-0,32}$
Kirpich	$T_c = 0,0663L^{0,77}S_t^{-0,385}$

Fonte: Autor (2024).

Onde T_c é o tempo de concentração, em horas, L é o comprimento do talvegue, em km e S_t a declividade do talvegue, em m/m. O comprimento do talvegue e a declividade da bacia são calculados automaticamente pelo Modelo Digital de Elevação (MDE) para a sub-bacia, dentro do próprio HEC-HMS. Diante disso, a Tabela 5 expressa esses valores do T_c para cada equação.

Tabela 5 – Parâmetros da sub-bacia do rio Ibirapuitã e valores do Tempo de concentração

Equação	L (km)	S_t (m/m)	T_c (hr)	T_c (min)
Corps Engineers	205,53	0,00132	38,54	2312,39
Ven te Chow	205,53	0,00132	40,34	2420,63
Kirpich	205,53	0,00132	51,41	3084,31

Fonte: Autor (2024).

Nas simulações realizadas no presente estudo, foi utilizado o valor médio entre as três equações apresentadas na Tabela 6. Na Tabela 6, estão listados os valores de todos os parâmetros, bem como o resultado médio após o cálculo do tempo de concentração, e o valor do *Lag time*, que é 60% desse valor, representando o momento em que o hidrograma é iniciada até o seu atraso.

Tabela 6 – Valor médio dos parâmetros da sub-bacia do rio Ibirapuitã e valores do Tempo de concentração

Sub-bacia	T_c (hr)	T_c (min)	<i>Lag time</i>
1	43,43	2605,77	1563,46

Fonte: Autor (2024).

4.3.4 Parâmetros iniciais do modelo

Gerenciando os parâmetros iniciais para a aplicação dentro do modelo, os cálculos para cada um dos métodos segue as características específicas para a região. Com isso, o valor de CN calculado é o melhor a ser utilizado, seguindo o que foi corroborado por Sartori, Lombardi e Genovez (2005) e Anjinho *et al.* (2018), e verificado pelos dados apresentados por ANA (2023a) para a bacia do Ibirapuitã. E através desse valor, foi encontrada a abstração inicial (I_a), que é 20% do potencial máximo de retenção do solo (S), determinando a parcela que deve ser descontada da chuva total antecedendo a sua mudança em chuva efetiva (MISHRA; BABU; SINGH, 2007).

O valor para o *Lag time* que foi calculado pela média entre as equações do Tempo de concentração (T_c) de *Kirpich*, *Corps Engineers* e *Ven te Chow*, que são apresentadas por Cargnin, Oliveira e Andrades-Filho (2023) e Silveira (2019), possuem uma boa aplicação, e não sofre alterações em relação aos dados otimizados. Assim, os valores do *Baseflow* (Fluxo-base) que foram otimizados, também não obtiveram uma mudança, e com isso sabe-se que os parâmetros apresentados por Tallaksen (1995), são projetados para simular o comportamento típico observado em bacias hidrográficas, onde o escoamento do canal decresce exponencialmente após um evento hidrológico, e não precisam ser alterados para o modelo

A Tabela 7 representa os valores para cada um dos métodos apresentados anteriormente, após verificar que não precisam ser alterados, seguindo os valores que foram gerados através da otimização.

Tabela 7 – Parâmetros iniciais das modelagens hidrológicas

Sub-bacia	<i>Ia</i>	<i>CN</i>	<i>Lag time</i>	<i>RP</i>	<i>RC</i>
1	13,50	79	1563,46	0,50	0,50

Fonte: Autor (2024).

Os dados foram separados e organizados para o intervalo do período histórico de análise, no qual se tem os dados do CHIRPS, efetuando uma organização dos dados no software R e assim gerado os valores de precipitação, em representações estatísticas e gráficas, que ocorreram nesse espaço de tempo. Esses valores são apresentados para toda a bacia, no qual foi realizada uma média para verificar os acontecimentos presentes na área de estudo.

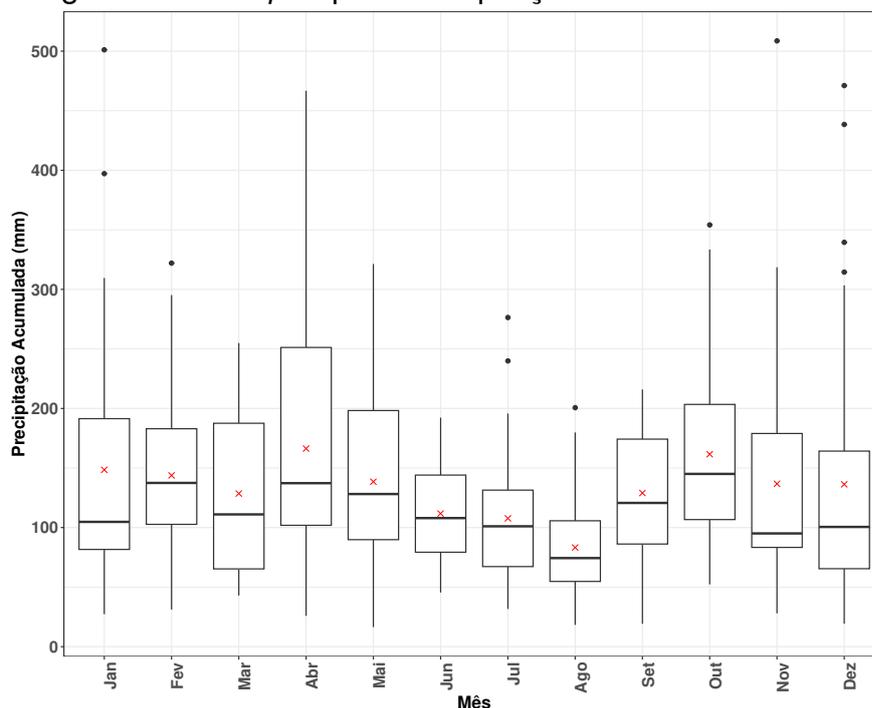
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na seção 5.1, será apresentada uma análise climatológica abrangente da bacia, considerando o extenso período histórico de 1982 a 2021. Essa análise proporcionará uma compreensão aprofundada das condições climáticas ao longo quatro décadas, desempenhando um papel fundamental para a avaliação dos resultados subsequentes. Bem como a modelagem hidrológica para a bacia, nos diferentes intervalos de tempo para toda a série histórica e para cada evento com ocorrência de cheias.

5.1 Climatologia

O município de Alegrete apresenta uma classificação climática de acordo com a classificação de Köppen como "Cfa", possuindo um clima subtropical úmido. Isso implica que a região está suscetível a temperaturas quentes durante a maior parte do ano, com o mês mais frio mantendo uma média acima de 0°C ou -3°C e, pelo menos, quatro meses com temperaturas médias superiores a 10°C. Além disso, a notável característica deste clima é a distribuição uniforme de precipitação ao longo do ano, o que significa que não há uma estação seca bem definida.

A média anual de pluviosidade sobre a bacia do rio Ibirapuitã é de 1.592 mm, sendo agosto o mês mais seco, com 83,2 mm, e abril o mês com maior precipitação acumulada, apresentando uma média de 166,3 mm, seguido por outubro, com uma quantidade acumulada de 161,6 mm (Figura 22). Isso é descrito por Rasera *et al.* (2018), que corroboram os meses com maior quantidade de precipitação no Estado do Rio Grande do Sul, usando dados reanalisados de 2005 a 2010, e identificando padrões atmosféricos específicos que diferenciam ambientes convectivos organizados de não organizados.

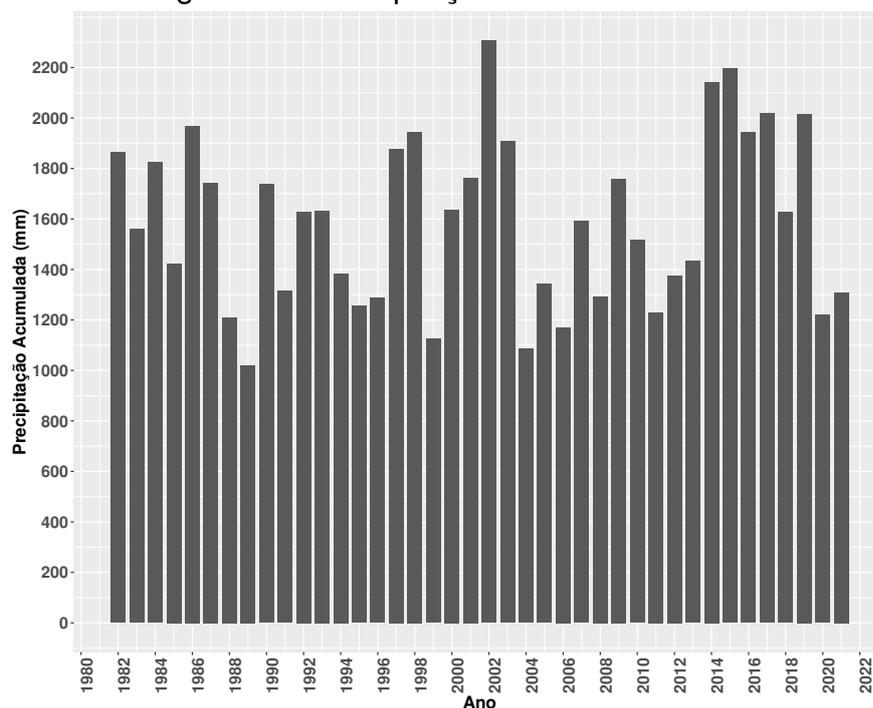
Figura 22 – *Box plot* para Precipitação Acumulada Mensal

Fonte: Autor (2024).

De acordo com o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), há uma tendência preocupante de aumento na frequência e na intensidade de eventos climáticos extremos, como secas prolongadas, enchentes e ondas de calor. Além disso, estudos recentes do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE) indicam uma possível alteração nos padrões de sazonalidade, com um aumento nas temperaturas médias ao longo do ano.

Essas tendências destacam a urgência de políticas públicas eficazes para enfrentar os desafios das mudanças climáticas, incluindo a promoção de fontes de energia renovável, medidas de conservação ambiental e estratégias de adaptação para comunidades vulneráveis em todo o país. Além disso, é fundamental considerar que, durante o período analisado neste estudo, foram registrados anos específicos com episódios de maiores precipitações acumuladas. Picos notáveis de precipitação, atingindo 2015 mm, 2016 mm, 2142 mm, 2197 mm e 2306 mm, ocorreram, respectivamente, nos anos de 2019, 2017, 2014, 2015 e 2002 (Figura 23).

Figura 23 – Precipitação acumulada anual

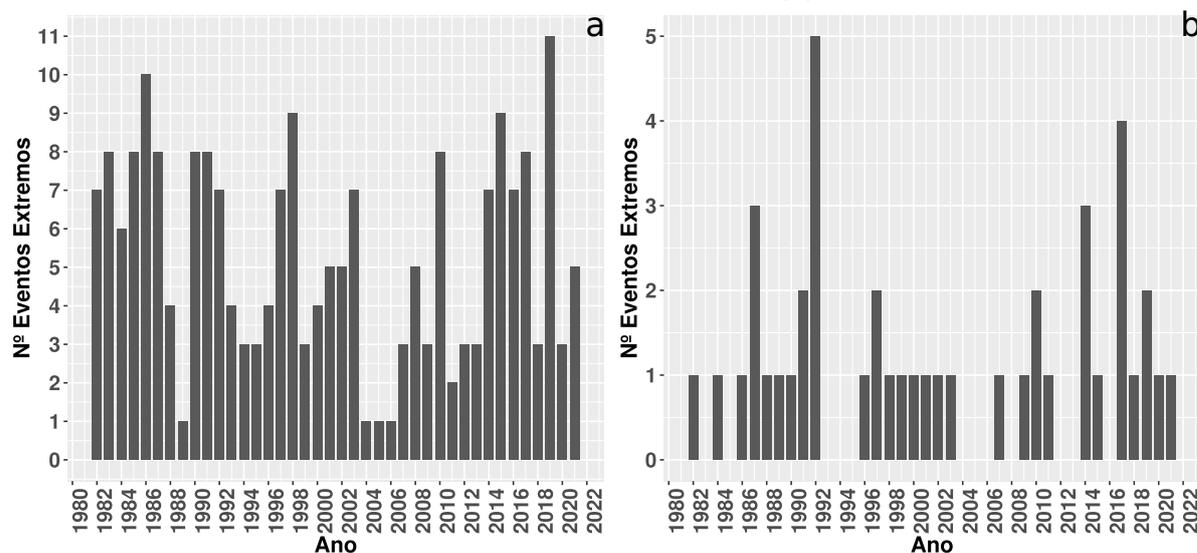


Fonte: Autor (2024).

Na gestão e gerenciamento de riscos climáticos, o uso do percentil 95% é amplamente reconhecido como um limiar eficaz para identificar eventos extremos de precipitação. Durante o período de estudo na bacia do rio Ibirapuitã, esse limiar foi estabelecido em 44,6 mm/dia, indicando a quantidade de precipitação acima da qual os eventos são considerados extremos. No entanto, eventos verdadeiramente raros e de magnitude excepcional podem ser identificados usando o percentil de 99%, que corresponde a uma precipitação de 68 mm/dia na área de estudo.

Ao longo da quatro últimas décadas, foram registrados 212 eventos extremos de precipitação, com 95% do percentil, com uma média anual de 5 eventos por ano (Figura 24a). Em contrapartida, eventos extremamente raros, conhecidos como extremíssimos (99% do percentil), ocorreram de forma significativamente menos frequente, totalizando 43 ocorrências durante o mesmo período, resultando em uma média anual de 1 evento por ano (Figura 24b). Esse contraste ilustra a excepcional raridade desses eventos de extrema magnitude.

Figura 24 – A ocorrência de eventos extremos (a) e a ocorrência de eventos extremíssimos (b)

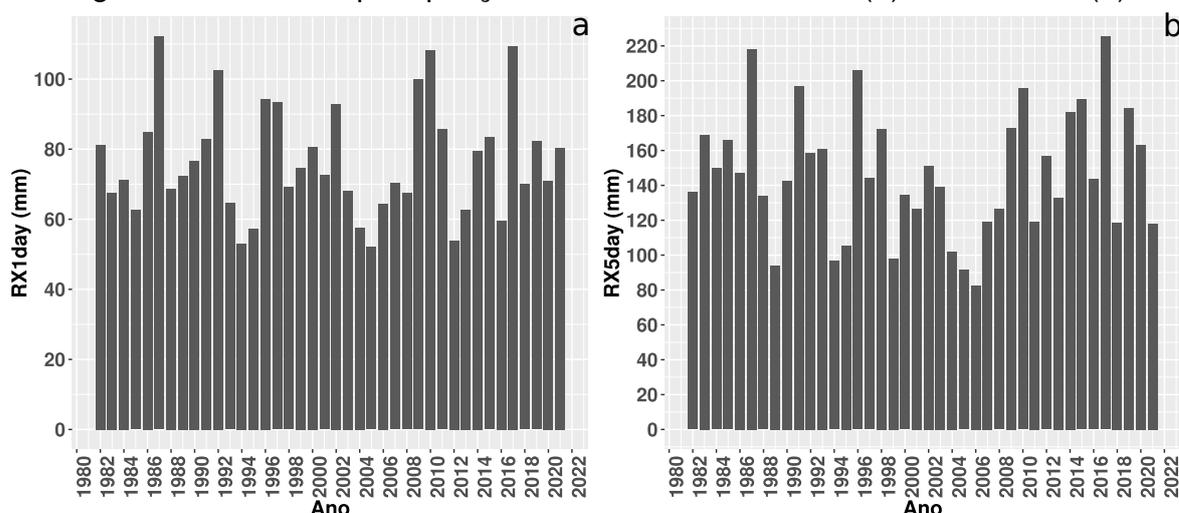


Fonte: Autor (2024).

O índice *RX1day* é uma métrica representativa da intensidade dos eventos extremos identificados, uma vez que reflete o valor máximo de precipitação em um único dia. Observou-se a ocorrência de pelo menos cinco eventos nos quais a precipitação diária acumulada superou 100 mm. Esses eventos ocorreram nos anos de 1987, 1992, 2008, 2010 e 2017, como evidenciado na Figura 25a. É fundamental ressaltar que uma precipitação de 100 mm/dia é mais do que o dobro do valor correspondente ao percentil 95, destacando a extrema magnitude desses eventos.

Por outro lado, o índice *RX5days* é relevante para avaliar a intensidade de eventos extremos com duração de até 5 dias, uma vez que representa o valor máximo de precipitação acumulada em 5 dias consecutivos. Durante o período analisado, foram registradas a ocorrências de 24 eventos, nos quais a precipitação acumulada superou a média mensal de precipitação de 136 mm. O valor máximo de precipitação acumulada em 5 dias consecutivos foi de aproximadamente 225 mm, observado no ano de 2017 (Figura 25b).

Figura 25 – Máxima precipitação acumulada em um dia (a) e cinco dias (b)

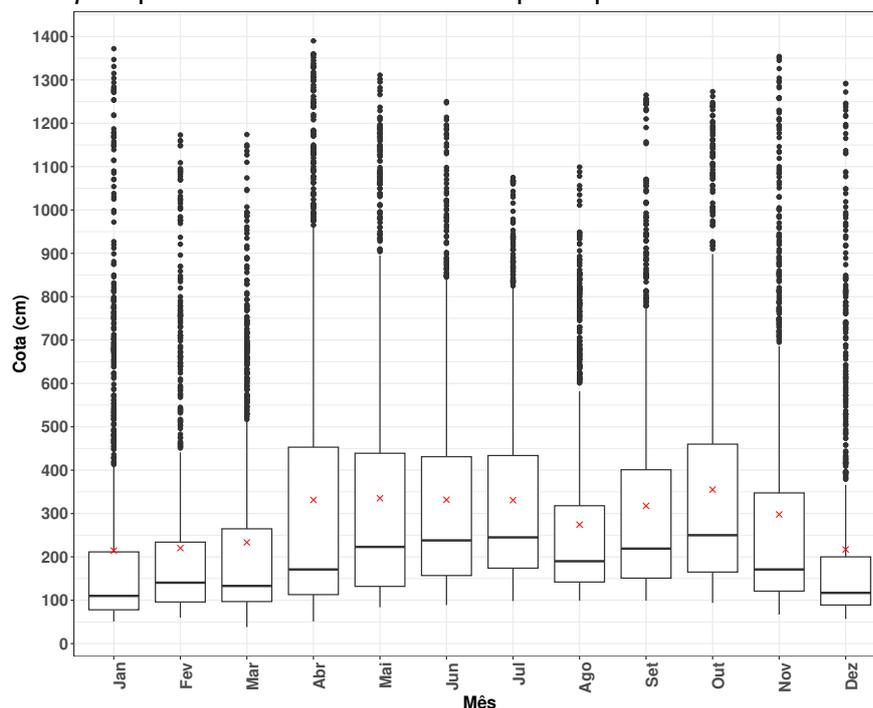


Fonte: Autor (2024).

No período de 1982 a 2021, o rio Ibirapuitã manteve uma cota média de aproximadamente 288 cm, nos quais, entre os meses de dezembro e março, a bacia registrou as cotas médias mensais mais baixas, em torno de 220 cm, não coincidindo com o período mais seco (Figuras 22 e 26) . Esse fato pode ser atribuído ao processo de evapotranspiração, que é mais intensa em meses mais quentes do ano, e com um período solar mais longo.

Por outro lado, o intervalo dos meses de abril a novembro, com exceção do mês de agosto, observa-se as cotas médias mensais mais elevadas, superiores a 300 cm. Os meses mais chuvosos na bacia são abril e outubro, coincidindo com as maiores cotas médias mensais. Mesmo que a precipitação acumulada média mensal seja inferior à média, de aproximadamente 100 mm, nos meses de junho e julho a cota média mensal se mantém próxima à observada em abril. Isso se deve ao fato de que esses meses apresentam temperaturas mais baixas e dias mais curtos, o que limita a evapotranspiração.

Figura 26 – *Box plot* para cota diária do rio Ibirapuitã para cada um dos meses do ano



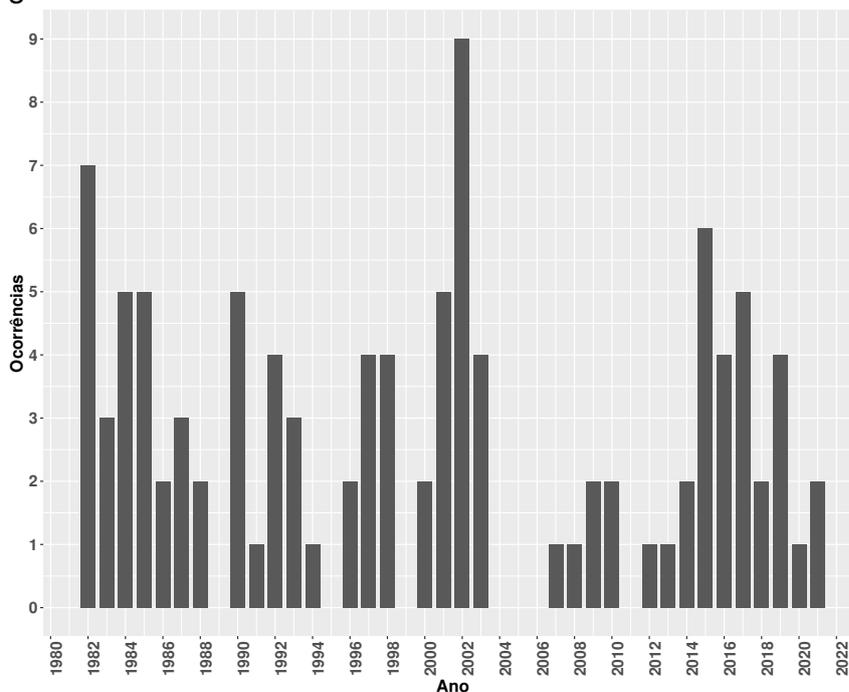
Fonte: Autor (2024).

O método conhecido como pico acima do limiar, muitas vezes definido de forma arbitrária, é amplamente utilizado para identificar eventos de enchentes. Nesse contexto, o limiar é estabelecido como o valor a partir do qual todas as ocorrências o superam, sendo assim considerados como eventos de cheia. No município de Alegrete, a Defesa Civil classifica a cota de 840 cm como o limiar para a ocorrência de um evento de enchente. Neste estudo, o término de um evento de enchente é determinado quando a cota permanece abaixo do limiar estabelecido pela Defesa Civil (840 cm) por pelo menos 7 dias consecutivos. O limiar de vazão a qual considera-se um evento de enchente, pode ser determinado ajustando os parâmetros (h_0 , a , e n) da equação 3.1), que melhor representa a relação entre os vazão e a cota observada pela estação (Figura 5). Os parâmetros que melhor ajustam essa relação são $h_0 = 0,217$, $a = 16,6$ e $n = 1,68$. Logo, o limiar da vazão para eventos de enchentes é de aproximadamente $568 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

No período considerado neste estudo, o município de Alegrete experimentou um total de 105 eventos de enchentes, destacando-se o ano de 2002, quando ocorreram nove enchentes. Nas últimas quatro décadas, apenas sete anos passaram sem registrar ao menos um episódio de enchente. Esses anos são: 1989, 1995, 1999, 2004, 2005, 2006 e 2011 (Figura 27). A Figura 28 apresenta o número de enchentes registradas em cada um dos meses no período histórico de 1982 a 2021. Durante esse período, houve um total de 94 dias com ocorrência de enchentes durante o fenômeno La Niña. Além disso, foram registrados 325 dias com enchentes na situação de El Niño e 274 dias em

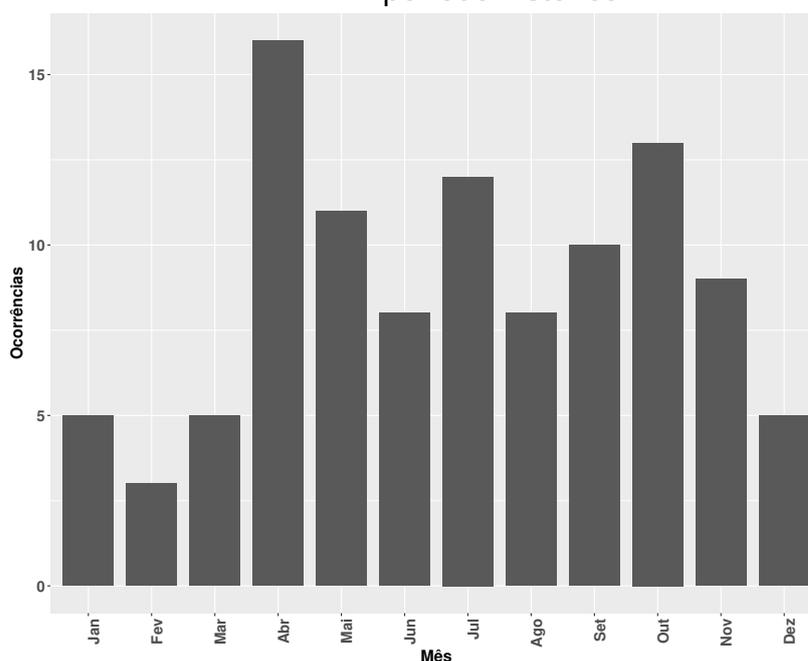
condições neutras (Figura 29). Observa-se que o maior número de ocorrências ocorre no mês de abril, seguido de outubro, coincidindo com o período em que a precipitação acumulada é mais significativa. Por outro lado, o mês que registrou o menor número de ocorrências foi fevereiro, seguido de janeiro e dezembro.

Figura 27 – Ocorrência anual de eventos de enchentes na bacia



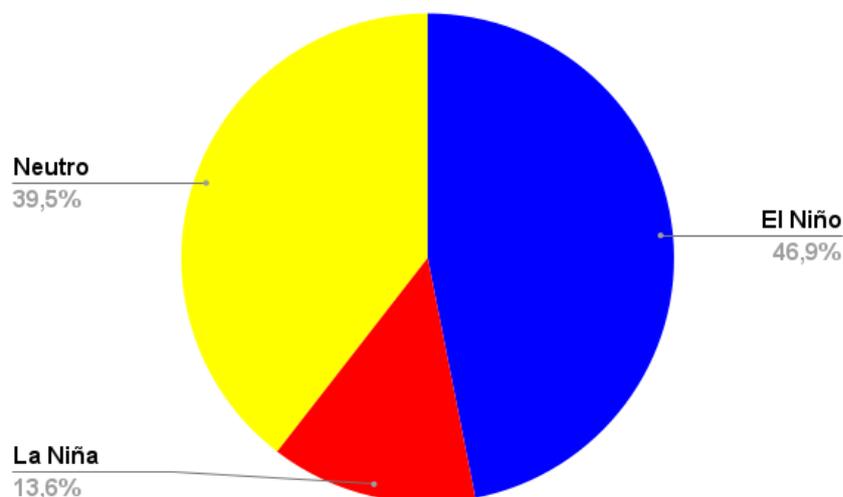
Fonte: Autor (2024).

Figura 28 – Ocorrência mensal de eventos de enchentes na bacia ao longo de todo o período histórico



Fonte: Autor (2024).

Figura 29 – Ocorrência de enchentes com os períodos El Niño, La Niña e Neutro



Fonte: Autor (2024).

5.1.1 Impactos das Enchentes no Município de Alegrete

No município de Alegrete, a cota de 8,4 m é classificada como o limiar para a ocorrência de enchentes. Segundo Gonzato (2019), a maior cota atingida desde 1940 foi de 14,45 m, e a décima maior foi de 13 m. Com o intuito de quantificar a região afetada e o impacto dessas enchentes, a Figura 30 apresenta as manchas de inundação considerando as cotas de 8,40 m, 13,00 m e 14,45 m.

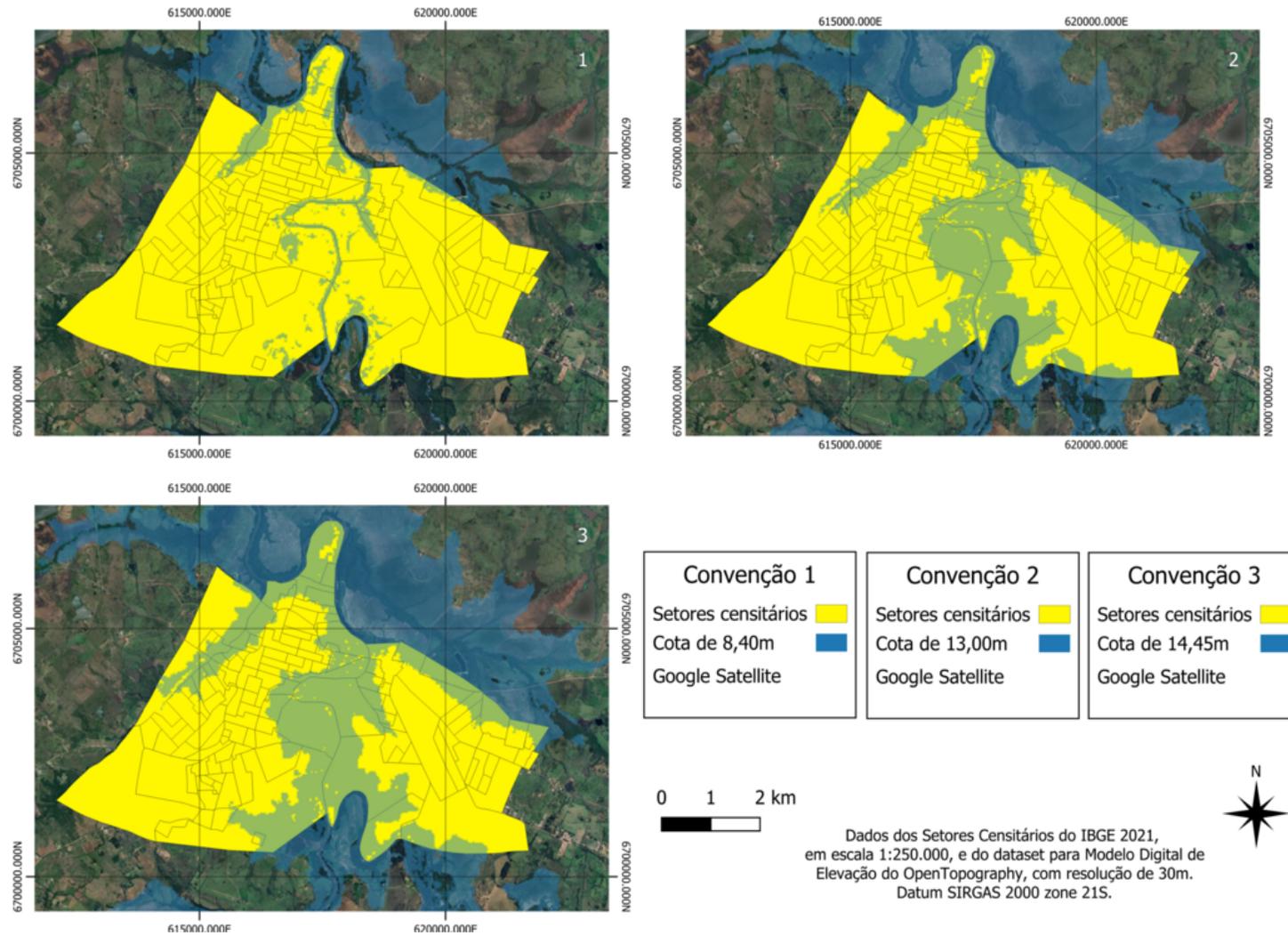
Nesta análise, o município de Alegrete foi dividido em cinco zonas: norte, sul, leste, oeste e central. As áreas afetadas quando a cota do rio atinge essas altitudes estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Áreas de inundação das zonas em diferentes cotas

Local com aumento da cota	Área (km ²)		
	Cota de 8,40m	Cota de 13,00m	Cota de 14,45m
Zona Central	0,105	0,421	0,523
Zona Leste	0,865	4,454	5,165
Zona Norte	0,768	1,634	1,754
Zona Oeste	0,395	1,076	1,442
Zona Sul	0,629	2,771	3,3121

Fonte: Autor (2024).

Figura 30 – Malhas de inundações com as cotas de 8,45m, 13,00m e 14,45m



Fonte: Autor (2024).

5.2 Simulações Hidrológicas

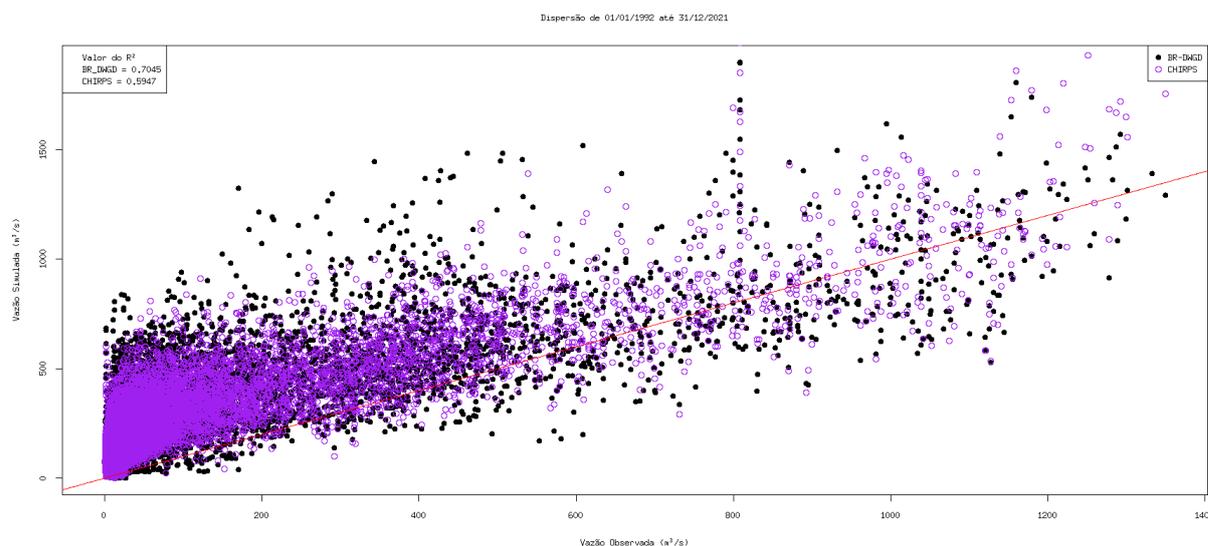
Os tópicos abordados nessa seção descrevem os resultados encontrados para a modelagem hidrológica. Em torno disso, são expressadas os melhores resultados e analisado qual conjunto de dados serão utilizados para a elaboração dos resultados finais.

5.2.1 Análise dos diferentes conjuntos de dados

O conjunto de dados de precipitação do BR-DWGD é obtido por meio de técnicas de interpolação, utilizando informações de um total de 3.625 pluviômetros e 735 estações meteorológicas. Em contraste, o CHIRPS estima a precipitação combinando imagens de satélite com observações in situ.

Essa análise comparativa entre os dois conjuntos de dados é para poder verificar qual deles apresentava o melhor coeficiente de determinação (R^2) para a simulação hidrológica em questão. Os resultados indicaram que os dados do BR-DWGD, especialmente para a série histórica de 30 anos, proporcionaram um ajuste superior. Conseqüentemente, esses dados foram utilizados na modelagem hidrológica da bacia do rio Ibirapuitã, destacando sua eficácia e precisão para esse tipo de aplicação (Figura 31).

Figura 31 – Diagramas de dispersão para vazão simulada e observada considerando a precipitação provenientes dos produtos BR-DWGD e CHIRPS



Fonte: Autor (2024).

5.2.2 Calibração e Otimização

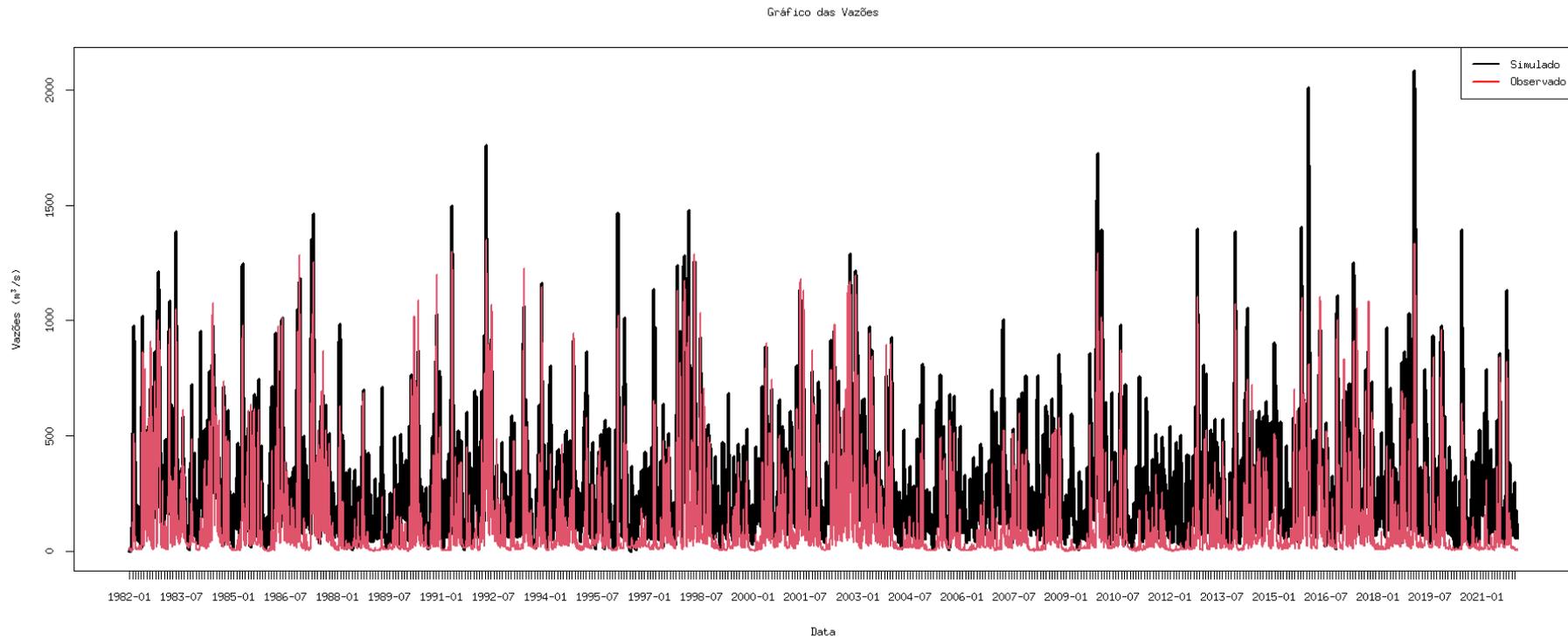
De acordo com o manual do HEC-HMS (USACE, 2015), os parâmetros necessários para a simulação podem ser estimados diretamente a partir de medições

de campo, utilizando procedimentos de topografia padrão, ou a partir de mapas desenvolvidos por meio de levantamento topográfico. Outros parâmetros que, no entanto, podem ser estimados indiretamente com base em medições de campo. Frequentemente, tem-se incertezas em torno dos valores reais para esses parâmetros, o que exige ajustes nas estimativas para que o modelo simule adequadamente as vazões calculadas dentro do modelo. Esse ajuste pode ser realizado por um procedimento iterativo, chamado Otimização, iniciado com os parâmetros apresentados na Tabela 7. Os valores dos parâmetros são ajustados pelo método de busca iterativa até que o erro seja reduzido a um valor aceitável, ou que o número máximo de iterações seja alcançado.

Com o intuito de calibrar o modelo, aplicou-se o procedimento de otimização disponível no HEC-HMS em uma simulação contínua que se iniciou em janeiro de 1982 e foi até dezembro de 2021, totalizando 40 anos. Ao final desse processo, os parâmetros finais que foram ajustados, não obtiveram diferença em relação aos que foram apresentados inicialmente. Essa simulação apresentou diferentes resultados, sendo representado na Figura 32 a série temporal simulada e observada, enquanto a Figura 33 apresenta o gráfico de dispersão e a correlação dos dados, implementando que os dados apresentados para a série histórica de 40 anos não apresenta discrepância em relação à de 30 anos, que, por meio da técnica de Pearson (1895), desempenha uma medida estatística que possibilita associar as relações entre duas variáveis contínuas. E, assim, poder ser explicado que o modelo tende a superestimar as vazões simuladas, especialmente quando a vazão da bacia está próxima aos valores mínimos observados. Isso ocorre devido à saturação do solo, onde a precipitação é diretamente transformada em escoamento. E como utilização do CN, são recomendadas períodos curtos para as simulações, no qual é expressa por muitos autores na literatura, por suas aplicações em diferentes áreas de estudo (ASSAYE *et al.*, 2021; IBRAHIM *et al.*, 2022), não sendo utilizado esse modelo para simulações longas. Outro fato a ser destacado é a ausência de um modelo para evapotranspiração, uma vez que o objetivo do presente trabalho é simular eventos extremos.

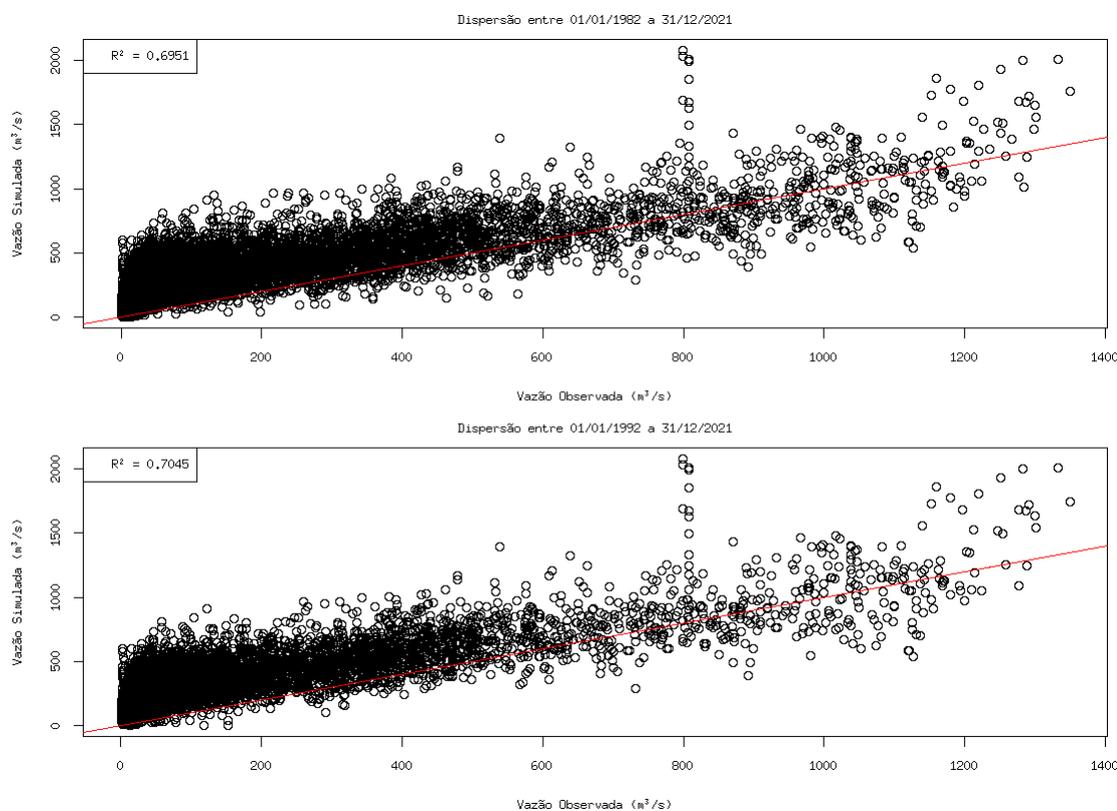
Em relação aos picos de vazão máxima, observa-se que o modelo tende a adiantar sua ocorrência, apresentando uma diferença média de zero a cinco dias entre as datas observadas e simuladas. Em média, a simulação antecipa o pico máximo em 1 dia, para os 79 eventos com valores acima dos 600 m³/s (vide Anexo B). Esse fato é justificado pela saturação do solo, ocasionando uma vazão excessiva, do escoamento superficial.

Figura 32 – Comparação entre os dados observados e os simulados no período de calibração de 1982-2021.



Fonte: Autor (2024).

Figura 33 – Diagrama de dispersão entre as vazões simuladas e observadas utilizando série histórica precipitação em um período de 40 anos (superior) e 30 anos (inferior) do BR-DWGD



Fonte: Autor (2024).

5.2.3 Estudos de Caso

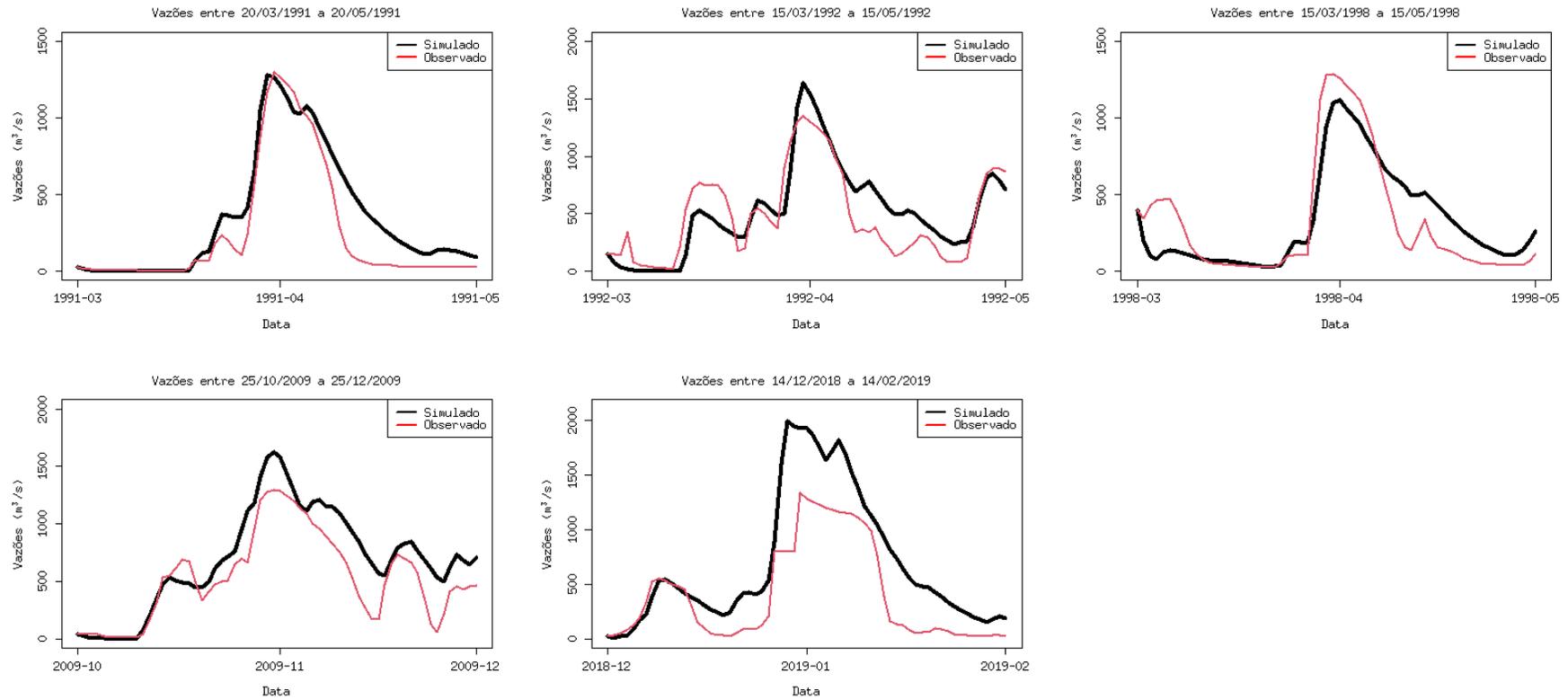
Uma vez que os parâmetros foram otimizados e o modelo calibrado, a simulação de eventos específicos e a avaliação de cada aplicabilidade a previsão de enchentes futuras. Para esse fim, nas simulações com duração de dois, quatro e seis meses, o pico máximo observado é encontrado no meio do intervalo de simulação, com o intuito de verificar quais são às três variações temporais ideais para serem adotadas nas previsões. Para esse fim, foram consideradas as maiores enchentes apresentadas por Gonzato (2019) no período de 1982 a 2021. Assim, serão considerados os seguintes eventos:

- 20 de abril de 1991
- 15 de abril de 1992;
- 15 de abril de 1998;
- 25 de novembro de 2009;
- 14 de janeiro de 2019.

Foram realizadas um total de 3 simulações para cada um dos eventos mencionados anteriormente. Todas as simulações foram inicializadas com a vazão observada na bacia na data inicial correspondente a cada um dos casos considerados (Tabela C1). As séries temporais para um das simulações, com duração total de dois, quatro e seis meses, são apresentadas nas Figuras 34, 35 e 36, respectivamente. A duração das simulações pode influenciar a infiltração dos solos (Anexo A).

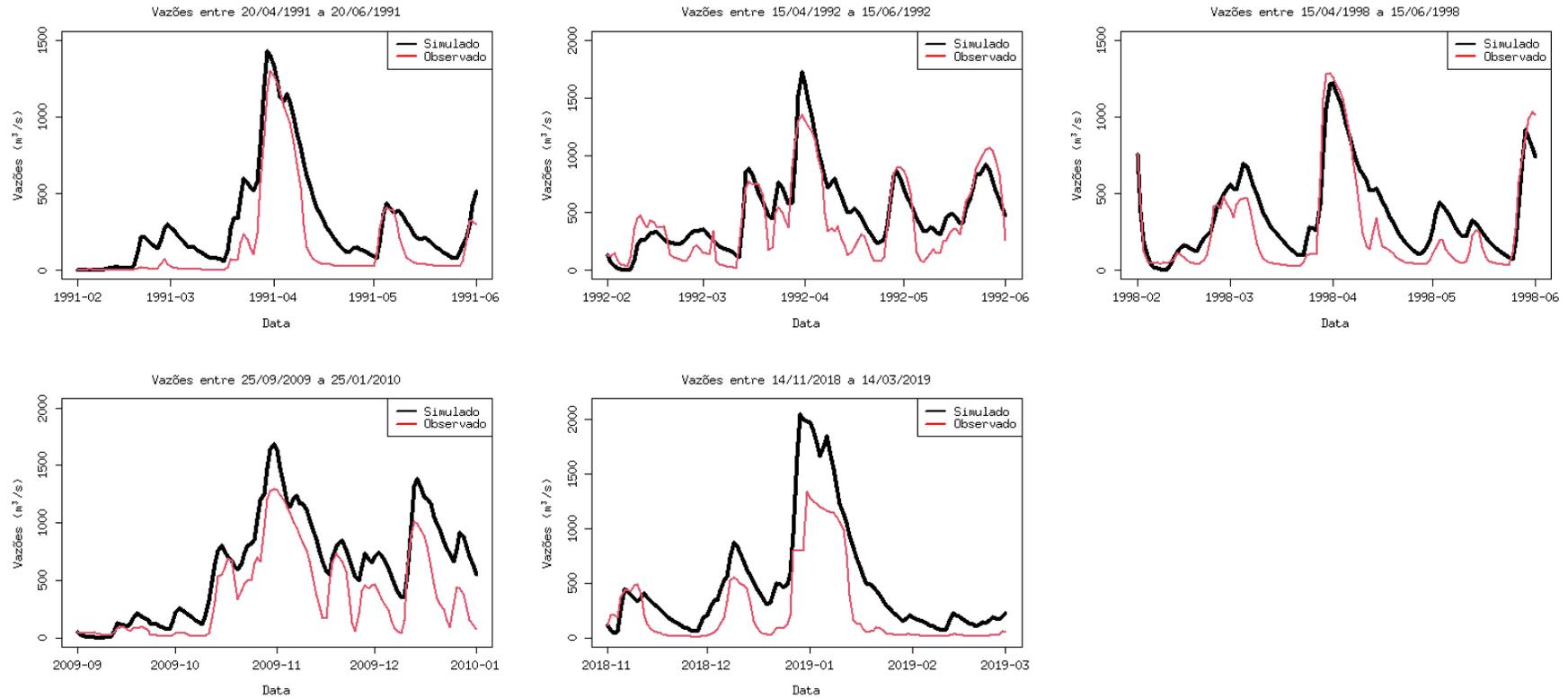
Os valores mais baixos de vazão causam alterações significativas na simulação do pico máximo de vazão. Os picos simulados acabam sendo maiores do que os observados devido à saturação do solo e ao longo período de simulação, resultando em uma maior quantidade de escoamento. Esse efeito é amplificado durante períodos de altos volumes de precipitação, especialmente em datas com maior ocorrência de cheias. Em 2019, por exemplo, com a grande quantidade de precipitação, apresentou pouca infiltração no solo, o que gerou um aumento significativo no escoamento. Como consequência, a região de Alegrete experimentou uma elevação nas cotas dos rios (Anexo A).

Figura 34 – Comparação entre os dados observados e os simulados em uma simulação de dois meses



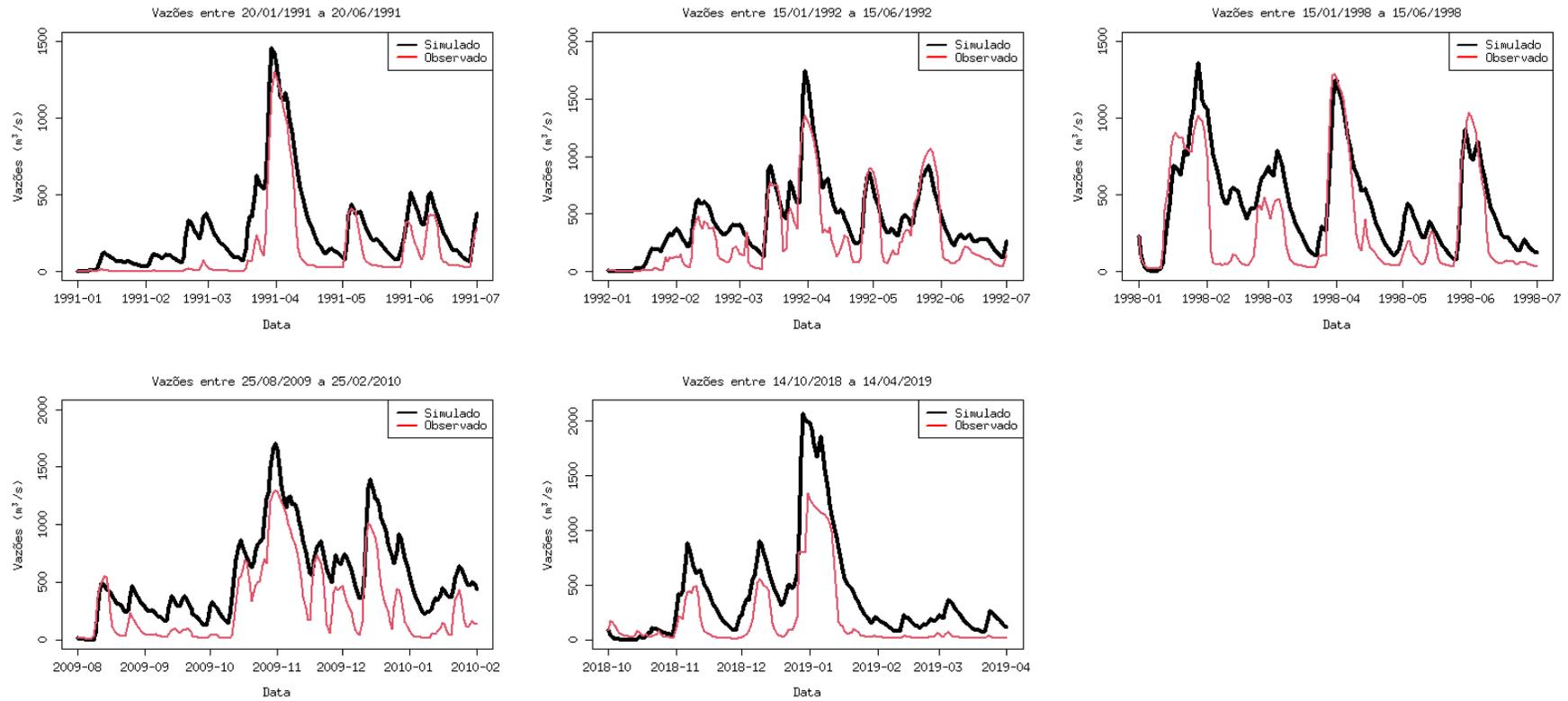
Fonte: Autor (2024).

Figura 35 – Comparação entre os dados observados e os simulados em uma simulação de quatro meses



Fonte: Autor (2024).

Figura 36 – Comparação entre os dados observados e os simulados em uma simulação de seis meses



Fonte: Autor (2024).

A cota máxima para cada evento pode ser estimada pelo inverso da equação 3.1. A cota máxima estimada tende a aumentar quando se consideram simulações mais longas, devido à saturação do solo. Isso pode ser explicado pelos estudos de Assaye *et al.* (2021) e Ibrahim *et al.* (2022), que abordam o método e o intervalo de aplicação do modelo proposto (Tabela 9).

Tabela 9 – Valores para as cotas simuladas e observadas para cada evento da bacia

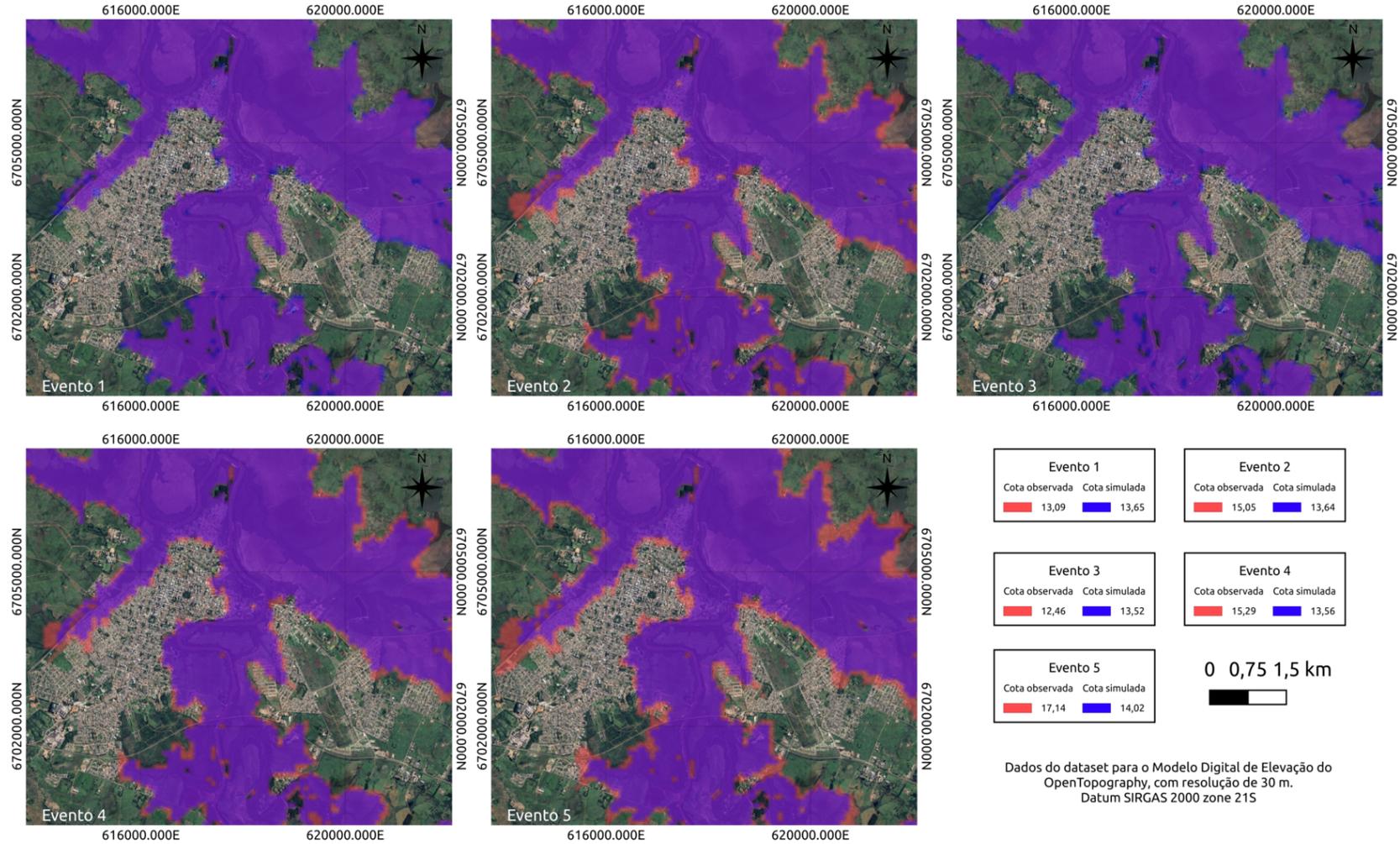
Dado	Vazão Simulada	Cota Simulada	Cota Observada
1991-03-20 a 1991-05-20	1215,40	13,09	13,65
1991-02-20 a 1991-06-20	1332,40	13,81	13,65
1991-01-20 a 1991-07-20	1351,10	13,93	13,65
1992-03-15 a 1992-05-15	1541,80	15,05	13,64
1992-02-15 a 1992-06-15	1619,00	15,48	13,64
1992-01-15 a 1992-07-15	1632,10	15,56	13,64
1998-03-15 a 1998-05-15	1116,50	12,46	13,52
1998-02-15 a 1998-06-15	1222,20	13,13	13,52
1998-01-15 a 1998-07-15	1247,80	13,29	13,52
2009-10-25 a 2009-12-25	1585,20	15,29	13,56
2009-09-25 a 2010-01-25	1634,50	15,57	13,56
2009-08-25 a 2010-02-25	1654,70	15,68	13,56
2018-12-14 a 2019-02-14	1925,60	17,14	14,02
2018-11-14 a 2019-03-14	1971,90	17,39	14,02
2018-10-14 a 2019-04-14	1980,60	17,43	14,02

Fonte: Autor (2024).

Analisando separadamente cada uma das simulações mencionadas anteriormente, pode ser verificado que as melhores aplicações estão em espaços de tempo mais curto, no caso de cada estudo, o intervalo de dois meses. Não se tem ao certo o que pode ter ocorrido com os dados de 2009 e 2019, que apresentam grande discrepância, que é ainda maior para ambos nos intervalos de quatro e seis meses.

E o impacto simulado para cada um dos casos considerados pode ser visualizado pelas manchas d'água, que permitem identificar as zonas afetadas pelas inundações e comparar com as inundações registradas na cidade de Alegrete, seguindo os dados que são encontrados após as simulações com os dados observados pela estação da ANA, respectivamente (Figura 37).

Figura 37 – Representação das cotas d'água dos dados observados e simulados após a modelagem



Fonte: Autor (2024).

6 CONCLUSÃO

As enchentes representam um desafio significativo no município de Alegrete-RS, enfrentando inundações periódicas devido ao transbordamento do rio Ibirapuitã. O município apresenta uma classificação climática de acordo com a classificação de Köppen como "Cfa", possuindo um clima subtropical úmido. Com uma média anual de pluviosidade de 1.592mm, com períodos mais secos em agosto e com maior ocorrência de precipitações em abril. Ao longo das últimas quatro décadas, foram registrados 212 eventos extremos de precipitação, sendo 43 extremíssimos.

A Defesa Civil de Alegrete classifica a cota de 840 cm como o limiar para a ocorrência de um evento de enchente. Neste estudo, o término de um evento de enchente é determinado quando a cota permanece abaixo do limiar estabelecido por pelo menos 7 dias consecutivos. Nas últimas quatro décadas, o município experimentou um total de 105 eventos de enchentes. De acordo com a curva chave da bacia a vazão mínima deve ser de aproximadamente 567.79 m³/s, para começar a alagar as regiões com menor altitude no município. Considerando as diferentes altitudes do município, tem-se que o leito em seu estado normal, apresenta uma altitude de 70 m em relação ao NMM, e com 78,40 m de altitude (8,40 m de cota) começa a afetar a população do bairro Vila Nova.

A calibração realizada no presente trabalho e a utilização do modelo HEC-HMS emerge como uma ferramenta capaz de prever e projetar distintos cenários de inundação. Nesse sentido aplicou-se o procedimento de otimização em uma simulação contínua que se iniciou em janeiro de 1982 e foi até dezembro de 2021, totalizando 40 anos. Ao final desse processo, os parâmetros não sofreram alteração em relação aos métodos calculados diretamente por sua topografias, cobertura, e uso do solo. De modo que o modelo calibrado pode ser utilizado para simular eventos específicos e avaliar sua habilidade na previsão de enchentes futuras.

Além disso, considerando que simulações para longos períodos de tempo podem causar uma saturação excessiva do solo, não permitindo que a precipitação infiltre e ocasionando escoamento superficial excessivo, devido ao modelo de SCS escolhido. Verificou-se a duração adequada da simulação, para isso foram consideradas simulações com duração de dois, quatro e seis meses, onde o pico de vazão encontrou-se no meio do intervalo. Os resultados mostram que o pico de vazão tende a ser superestimado nas simulações mais longas, justamente devido à saturação do solo.

Seguindo as análises, foi verificado que os eventos dos anos de 1991, 1992 e 1998 foram simulados adequadamente, e os que possuem pouca confiabilidade são os anos de 2009, por possuir baixos valores de NS, e 2019, que apresenta valores negativos. Um dos principais fatores para a discrepância analisada é que o modelo

é calibrado com dados históricos, e caso alguma mudança no meandro, açoriamento do rio, desvios do mesmo, ou até mesmo na forma como os dados são coletados pela ANA não previstos e nem simulados pelo modelo.

Com a análise finalizada, algumas alterações podem ser realizadas para melhorar o entendimento e compreensão de análises dentro do HEC-HMS. Assim, torna-se essencial buscar outras aplicações para os métodos de perda, transformação e de fluxo-base. Podendo ser alterado o número de sub-bacias para verificar se ocorre alguma melhora, para novos métodos. Explorando a quantidade de dados e ver a sua aplicabilidade geral, comparando entre dados espaciais e pontuais, que ajudam na parte climatológica de outras formas, para compreender melhor as alterações e mudanças climáticas ao longo da série histórica. Deste modo, os intervalos maiores e menores para a variação temporal, podem auxiliar em uma melhor aplicação nos diversos modelos dentro da bacia.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista da FAE**, v. 20, n. 1, p. 129–137, 2017.

ALVES, F. H. B. **Sistema de previsão de enchentes: integração de modelos de previsão de chuva, simulação hidrológica e hidrodinâmica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2017.

AMARAL, R. S. M. do; COELHO, L. M. G.; VIEIRA, I. L. Avaliação do impacto da alteração do uso e ocupação do solo no escoamento superficial, estudo de caso aplicado à bacia hidrográfica do rio xanxerê. In: **XIV Encontro Nacional de Águas Urbanas e IV Simpósio de Revitalização de Rios Urbanos**. [S.l.: s.n.], 2022.

ANA. **Produção de base vetorial com o Curve Number (CN) para BHO 2014 (BHO_CN)**. 2023. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/d1c36d85-a9d5-4f6a-85f7-71c2dc801a67/attachments/NOTA_TECNICA_46_2018_SPR.pdf>. Acesso em 03 jul. 2023.

_____. **Série histórica**. 2023. Available in: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>. Access in 03 jul. 2023.

ANDRIEU, H.; MOUSSA, R.; KIRSTETTER, P.-E. The event-specific geomorphological instantaneous unit hydrograph (e-giuh): The basin hydrological response characteristic of a flood event. **Journal of Hydrology**, Elsevier, v. 603, p. 127158, 2021.

ANJINHO, P. S. *et al.* Espacialização do parâmetro curve number (cn) na bacia hidrográfica do ribeirão do lobo para o período de 1985 e 2017. In: **Anais eletrônicos do 16º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental**. São Carlos: ABRHidro, 2018. v. 1, p. 1–11.

ASSAYE, H. *et al.* Curve number calibration for measuring impacts of land management in sub-humid ethiopia. **Journal of Hydrology**, Elsevier, v. 35, p. 100819, 2021.

BAI, Y.; ZHANG, Z.; ZHAO, W. Assessing the impact of climate change on flood events using hec-hms and cmip5. **Water, Air, & Soil Pollution**, Springer, v. 230, p. 1–13, 2019.

BRADY, N. C.; WEIL, R. L. **Elementos da natureza e propriedades do solo**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

BUCHIANERI, V. C. **Geração da série histórica de vazão por meio do modelo SMAP: subsídio para o plano de manejo da bacia do Rio Grande de Ubatuba**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São Paulo, 2004.

CAI, W. *et al.* Climate impacts of the el niño–southern oscillation on south america. **Nature Reviews Earth & Environment**, Nature Publishing Group, v. 1, n. 4, p. 215–231, 2020.

_____. Changing el niño–southern oscillation in a warming climate. **Nature Reviews Earth & Environment**, Nature Publishing Group, v. 2, n. 9, p. 628–644, 2021.

CARGNIN, B. da R.; OLIVEIRA, G. G. de; ANDRADES-FILHO, C. de O. Desempenho de equações para tempo de concentração em diferentes bacias do rio grande do sul. In: **Anais do XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE, 2023. p. 156339.

FILHO, G. M. M. *et al.* Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 6, n. 2, p. 35–47, 2013.

FILHO, J. D. P. *et al.* Copula-based multivariate frequency analysis of the 2012–2018 drought in northeast brazil. **Water**, MDPI, v. 12, n. 3, p. 834, 2020.

FRANCHINI, M.; PACCIANI, M. Comparative analysis of several conceptual rainfall-runoff models. **Journal of hydrology**, Elsevier, v. 122, n. 1-4, p. 161–219, 1991.

FUNK, C. *et al.* The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific data**, Nature Publishing Group, v. 2, n. 1, p. 1–21, 2015.

G1. **'Anos de vida perdidos em um dia por causa da água', diz moradora de São Gabriel sobre enchente**. 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2019/01/12/anos-de-vida-perdidos-em-um-dia-por-causa-da-agua-diz-moradora-de-sao-gabriel-sobre-enchente.ghtml>>. Acesso em 18 mai. 2023.

GARAY, L. V.; GOYENECHÉ, O. D. T.; SOTO, G. A. C. Evaluation of scs-unit hydrograph model to estimate peak flows in watersheds of norte de santander. **Respuestas**, Universidad Francisco de Paula Santander, v. 24, n. 1, p. 6–15, 2019.

GOMIG, K. *et al.* Áreas de influência das estações pluviométricas na bacia rio do peixe/sc pelo método de polígonos de thiessen utilizando imagem de satélite e sig. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil**, p. 21–26, 2007.

GONZATO, M. **Enchente em Alegrete é a maior em 60 anos**. 2019. Disponível em: <<https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2019/01/enchente-em-alegrete-e-a-maior-em-60-anos-cjr6vqkxf00dc01nxcaocy16e.html>>. Acesso em 26 jun. 2023.

HIERA, M. D. A influência de fenômenos climáticos de macroescala (el niño e la niña) no regime das chuvas na bacia hidrográfica paraguai 3. **UEM**, Universidade Estadual de Maringá, 2016.

IBGE. **Geociências**. 2021. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/download-s-geociencias.html>>. Acesso em 03 jul. 2023.

IBRAHIM, S. *et al.* Curve number estimation using rainfall and runoff data from five catchments in sudan. **Open Geosciences**, De Gruyter, v. 14, n. 1, p. 294–303, 2022.

JACCON, G. **Curva-chave: análise e traçado**. [S.l.]: DNAEE, 1989.

JAIN, S. K.; SINGH, V. P. **Water resources systems planning and management**. Cambridge: Elsevier, 2023.

KOPEGINSKI, S. I. R.; LINDINO, T. Educação ambiental para segurança alimentar na emergência climática. **Revista Pleiade**, v. 17, n. 38, p. 34–40, 2023.

KORMANN, T. C.; ROBAINA, L. E. de S. Interface entre geodiversidade e biodiversidade na reserva biológica do ibirapuitã, rio grande do sul. **Revista Caminhos de Geografia**, research, p. 112–126, 2021.

LASTRADA, E.; COBOS, G.; TORRIJO, F. J. Analysis of climate change's effect on flood risk. case study of reinosa in the ebro river basin. **Water**, MDPI, v. 12, n. 4, p. 1114, 2020.

LOUCKS, D. P. *et al.* An introduction to probability, statistics, and uncertainty. **Water Resource Systems Planning and Management**, Springer, p. 213–300, 2017.

MAGGIONI, V.; MASSARI, C. On the performance of satellite precipitation products in riverine flood modeling: A review. **Journal of Hydrology**, Elsevier, v. 558, p. 214–224, 2018.

MENDES, T. A. **Avaliação da Vulnerabilidade de Barramentos ao Rompimento de pequenos barramentos localizados a montante**. Dissertação (Mestrado), 2008.

MENEZES, D. J. *et al.* Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio ibirapuitã-rs. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, v. 1, p. 574–583, 2017.

MISHRA, S.; BABU, P. S.; SINGH, V. Scs-cn method revisited. **Water Resources Publications**, p. 1–36, 2007.

MORAES, J. M. *et al.* Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 61–70, 2003.

NATARAJAN, S.; RADHAKRISHNAN, N. Simulation of extreme event-based rainfall–runoff process of an urban catchment area using hec-hms. **Modeling Earth Systems and Environment**, Springer, v. 5, p. 1867–1881, 2019.

OKUMURA, Y. M.; DESER, C. Asymmetry in the duration of el niño and la niña. **Journal of Climate**, v. 23, n. 21, p. 5826–5843, 2010.

OLIVEIRA, J. B. **Pedologia Aplicada**. Piracicaba: FEALQ, 2008.

PACA, V. H. da M. *et al.* Variability of trends in precipitation across the amazon river basin determined from the chirps precipitation product and from station records. **Water**, MDPI, v. 12, n. 5, p. 1244, 2020.

PASSOS, J. R. d. S. **Modelagem e Simulação de Hidrógrafas**. Dissertação (Mestrado) — "Luiz de queiroz", Universidade Federal de São Paulo, 1993.

PEARSON, K. Note on regression and inheritance in the case of two parents. **Proceedings of the royal society of London**, The Royal Society London, v. 58, n. 347-352, p. 240–242, 1895.

RAJÃO, R. G. L. *et al.* **Uma breve história da legislação florestal brasileira: contém a lei nº 12.651, de 2012, com comentários críticos acerca da aplicação de seus artigos**. [S.l.]: Universidade Federal de Minas Gerais, 2021.

RASERA, G. *et al.* Developing an mcs index using the climatology of south america. **Meteorological Applications**, Wiley Online Library, v. 25, n. 3, p. 394–405, 2018.

RASERA, J. B. *et al.* Do gridded weather datasets provide high-quality data for agroclimatic research in citrus production in brazil? **AgriEngineering**, MDPI, v. 5, n. 2, p. 924–940, 2023.

REZENDE, V. S.; RIBEIRO, V. de O.; MENDES, Y. S. Determinação dos valores de número de deflúvio (cn) para o perímetro urbano de dourados-ms. In: **Anais 7º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal**. Jardim: Embrapa, 2018. v. 1, p. 230–239.

RODRIGUES, S. L.; GOMES, J. M. A.; CERQUEIRA, E. B. Dinâmica do uso e cobertura da terra nos municípios produtores da cana-de-açúcar (*saccharum officinarum* L.) no maranhão. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 60, 2022.

SANTOS, F. M. d.; LOLLO, J. A. d. Cartografia digital para estimativa de escoamento superficial visando ao planejamento urbano. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 21, p. 663–675, 2016.

SARTORI, A.; LOMBARDI, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos estados unidos parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 05–18, 2005.

SENTELHAS, P. C.; CARAMORI, P. H. Inconsistências na medida da chuva com pluviômetros de báscula, utilizados em estações meteorológicas automáticas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, UFSM, v. 10, n. 2, p. 301–304, 2002.

SGB. **Projeto de regionalização de vazões nas bacias hidrográficas brasileiras.** 2022. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/22873/6/analise_frequencia_cotas_alegrete.pdf>. Acesso em 14 mai. 2024.

SIEBRA, G. **Método Soil Conservation Service - SCS.** 2020. Disponível em: <<https://gustavosiebra.github.io/metodo-scs/>>. Acesso em 27 jul. 2024.

SILVEIRA, A. L. L. d. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. **Revista brasileira de recursos hídricos**, ABRH, v. 10, p. 5–23, 2019.

SOARES, M. R. G. d. J. *et al.* Eficiência do método curve number de retenção de águas pluviais. **Mercator (Fortaleza)**, SciELO Brasil, v. 16, p. e16001, 2017.

STRECK, E. V. *et al.* **Solos do Rio Grande do Sul.** UFRGS: EMATER/RS-ASCAR Porto Alegre, 2008. v. 2.

TALLAKSEN, L. A review of baseflow recession analysis. **Journal of hydrology**, Elsevier, v. 165, n. 1-4, p. 349–370, 1995.

TUCCI, C. E. **Modelos hidrológicos.** UFRGS: Associação Brasileira de recursos Hídricos, 1998.

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

URBANI, G. L.; GRACIOSA, M. C. P.; BRAMBILA, M. C. V. Delimitação de manchas de inundação na bacia do córrego do Ipiranga, São Paulo–SP, Brasil, com modelagem hidrológico-hidráulica utilizando HEC-HMS/HEC-RAS. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 20, n. 2023, 2023.

USACE. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS**
Version 4.1, Release Notes. 2015. Disponível em:
 <[https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical/Reference/Manual_\(CPD-74B\).pdf](https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical/Reference/Manual_(CPD-74B).pdf)>. Acesso em: 09 set. 2023.

WANDERLEY, H. S.; AMORIM, R. F. C. d.; CARVALHO, F. O. d. Variabilidade espacial e preenchimento de falhas de dados pluviométricos para o estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, SciELO Brasil, v. 27, p. 347–354, 2012.

_____. Interpolação espacial de dados médios mensais pluviométricos com redes neurais artificiais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, SciELO Brasil, v. 29, p. 389–396, 2014.

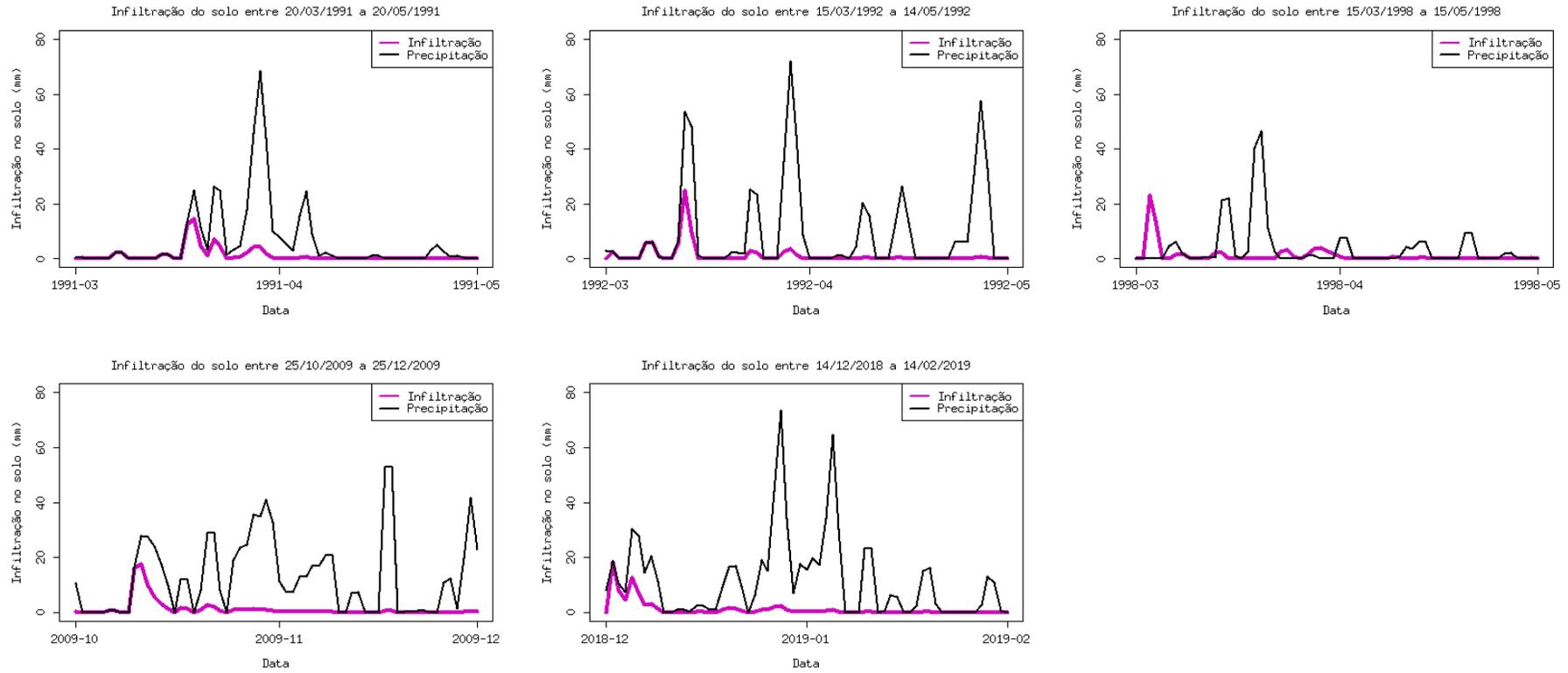
XAVIER, A. C. *et al.* New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). **International Journal of Climatology**, Wiley Online Library, v. 42, n. 16, p. 8390–8404, 2022.

YE, P. Remote sensing approaches for meteorological disaster monitoring: recent achievements and new challenges. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, MDPI, v. 19, n. 6, p. 3701, 2022.

ZHOU, Q. Digital elevation model and digital surface model. **International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology**, American Cancer Society, p. 1–17, 2017.

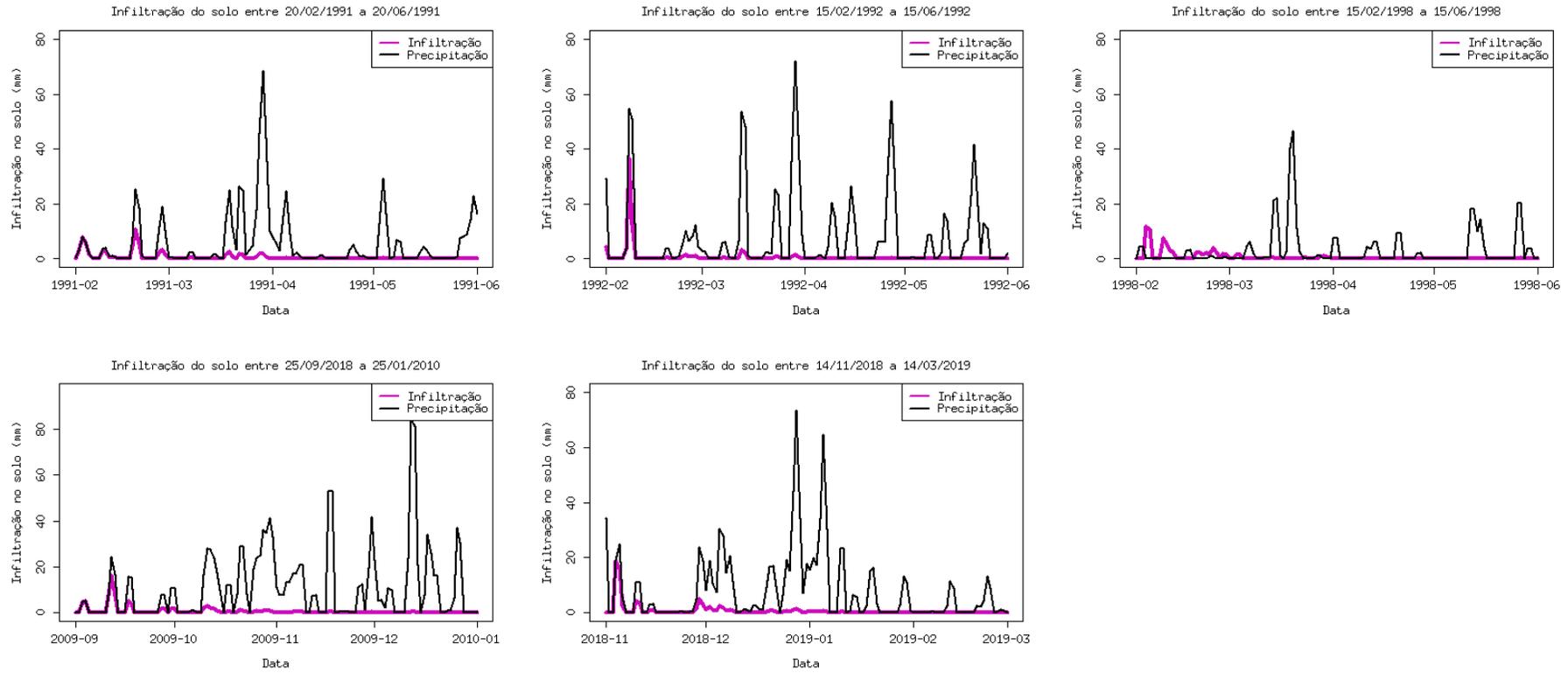
**ANEXO A – REPRESENTAÇÃO DAS INFILTRAÇÕES NO SOLO PARA AS
MAIORES CHEIAS REGISTRADAS**

Figura A1 - Infiltração no solo das simulações de dois meses



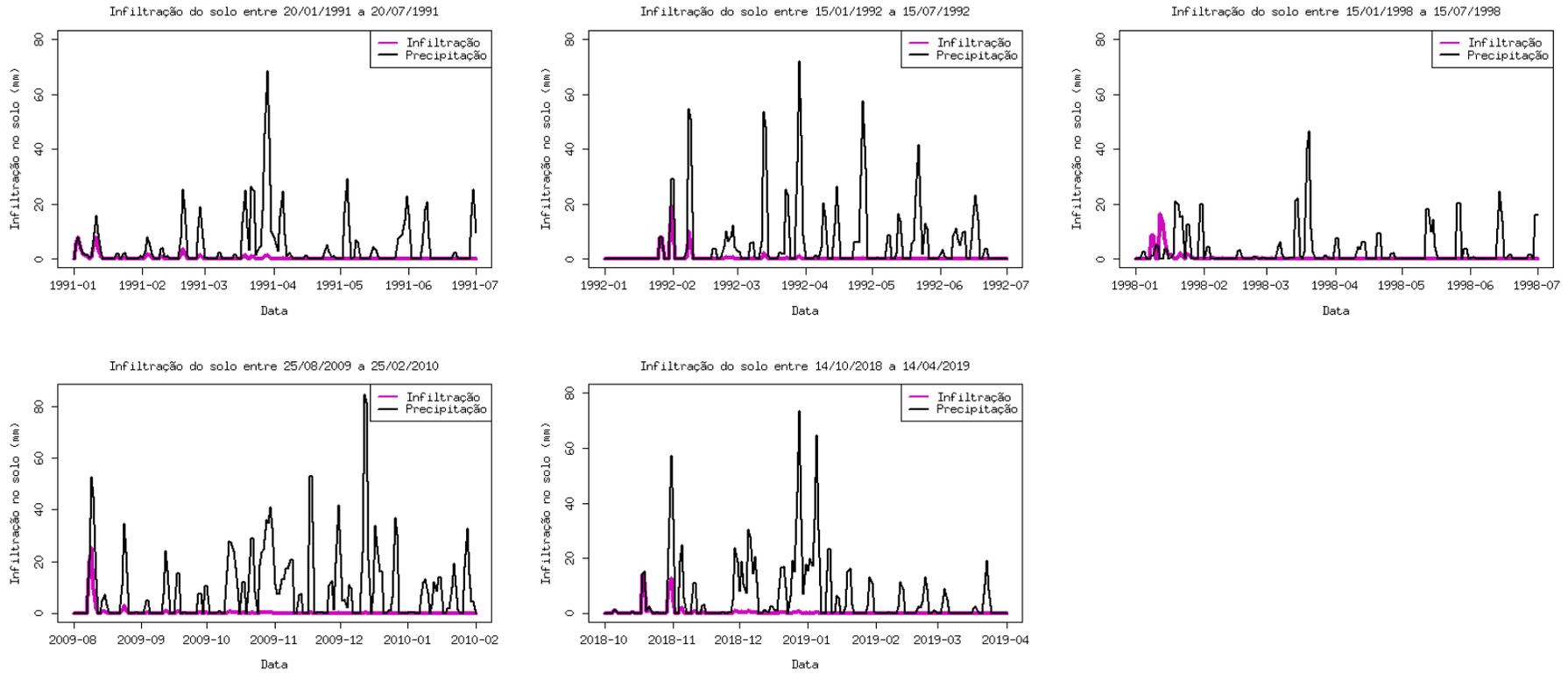
Fonte: Autor (2024).

Figura A2 - Infiltração no solo das simulações de quarto meses



Fonte: Autor (2024).

Figura A3 - Infiltração no solo das simulações de seis meses



Fonte: Autor (2024).

**ANEXO B – REPRESENTAÇÃO DOS PICOS DE VAZÃO PARA OS DADOS
SIMULADOS E OBSERVADOS**

Tabela B1 - Valor dos diferentes picos de vazão

Simulado	Vazão Simulada	Observado	Vazão Observada	Dias de Diferença
1982-05-12	629,1	1982-05-14	605,9	2
1982-08-09	704,9	1982-08-10	657	1
1982-09-19	716,8	1982-09-22	619,2	3
1982-10-23	906,5	1982-10-22	621,6	1
1983-02-16	809,2	1983-02-17	672,7	1
1984-09-20	651,4	1984-09-20	734,5	0
1985-07-02	603,2	1985-07-01	621,9	1
1985-08-03	605,4	1985-08-03	604,4	0
1985-09-17	668,1	1985-09-20	610,6	3
1986-05-20	601,1	1986-05-20	661,9	0
1986-11-01	701,1	1986-11-05	872,1	4
1986-11-25	643,2	1986-11-27	1283,8	2
1987-03-26	815,9	1987-03-27	619,2	1
1987-07-12	632,4	1987-07-15	691,9	3
1987-07-30	619,9	1987-07-28	676,8	2
1988-01-19	683,2	1988-01-23	619,2	4
1988-09-23	604,6	1988-09-26	652,1	3
1990-02-12	687,7	1990-02-15	644,7	3
1990-03-15	683,3	1990-03-15	670,6	0
1990-04-05	638,2	1990-04-04	702	1
1990-04-24	739,5	1990-04-24	685,6	0
1990-11-04	615	1990-11-05	890	1
1992-05-11	643,8	1992-05-11	669,8	0
1992-06-04	617,7	1992-06-04	661,4	0
1993-05-09	657,6	1993-05-10	667	1
1993-11-15	651,4	1993-11-15	798,5	0
1994-10-17	663,9	1994-10-18	638,6	1
1996-01-26	758,1	1996-01-27	768,9	1
1996-04-03	717	1996-04-05	624	2
1997-02-06	891,7	1997-02-08	652,1	2
1997-10-12	613,9	1997-10-14	839,4	2
1997-11-12	768	1997-11-12	654,5	0
1997-12-22	694	1997-12-22	636,1	0
1998-01-28	702,3	1998-01-29	674,3	1
1998-04-12	799,9	1998-04-11	601,2	1
1998-06-11	736,3	1998-06-11	753,2	0
2000-05-03	679	2000-05-04	684,3	1
2000-07-03	699,8	2000-07-03	600	0
2001-03-23	614,6	2001-03-25	607,1	2
2001-04-25	603,2	2001-04-28	652,1	3

Continua

Continuação

Simulado	Vazão Simulada	Observado	Vazão Observada	Dias de Diferença
2001-06-02	837,1	2001-06-03	799,2	1
2001-09-03	737,1	2001-09-05	759,7	2
2002-03-20	839	2002-03-21	633,7	1
2002-04-24	656,8	2002-04-26	707	2
2002-06-03	624,7	2002-06-03	634,9	0
2002-08-22	621,5	2002-08-23	615,5	1
2002-09-13	677,9	2002-09-13	859,8	0
2002-10-07	653	2002-10-07	636,1	0
2002-11-21	671,6	2002-11-22	639,8	1
2002-12-23	684,4	2002-12-24	650,8	1
2003-04-29	775,2	2003-04-29	686,8	0
2003-05-20	615,3	2003-05-22	724,9	2
2003-10-26	636,8	2003-10-24	731,3	2
2003-12-12	764,9	2003-12-11	895,5	1
2004-11-05	746	2009-11-09	612,4	4
2010-07-19	621,5	2010-07-24	620,4	5
2012-10-07	605,9	2012-10-08	708,6	1
2014-03-17	651	2014-03-18	694,1	1
2014-05-06	606,5	2014-05-05	720,4	1
2014-07-25	604,9	2015-07-24	700	1
2015-10-08	860	2015-10-08	769,7	0
2015-11-01	618,6	2015-11-03	682,7	2
2015-11-21	633,9	2015-11-17	646,1	4
2015-12-19	793,4	2015-12-22	657,6	3
2016-04-09	688,8	2016-04-10	842,6	1
2016-10-17	665,2	2016-10-18	727,6	1
2016-12-29	635,7	2016-12-31	751,7	2
2017-04-10	686,6	2017-04-12	776,8	2
2017-05-14	776,3	2017-05-14	677,1	0
2017-08-13	710,1	2017-08-14	619,2	1
2017-09-14	729,6	2017-09-15	702,5	1
2017-10-20	733,3	2017-10-24	602,1	4
2018-09-30	638,3	2018-10-03	610,3	3
2019-01-08	605,1	2019-01-09	799,6	1
2019-07-25	610,9	2019-07-26	655,2	1
2019-10-16	661	2019-10-17	647,3	1
2020-05-22	665,3	2020-05-25	639,5	3
2021-06-25	661,1	2021-06-27	708,1	2
2021-09-08	878,1	2021-09-08	682	0

Fonte: Autor (2024).

ANEXO C – REPRESENTAÇÃO DOS VALORES FINAIS PARA CADA MODELAGEM SEPARADAMENTE

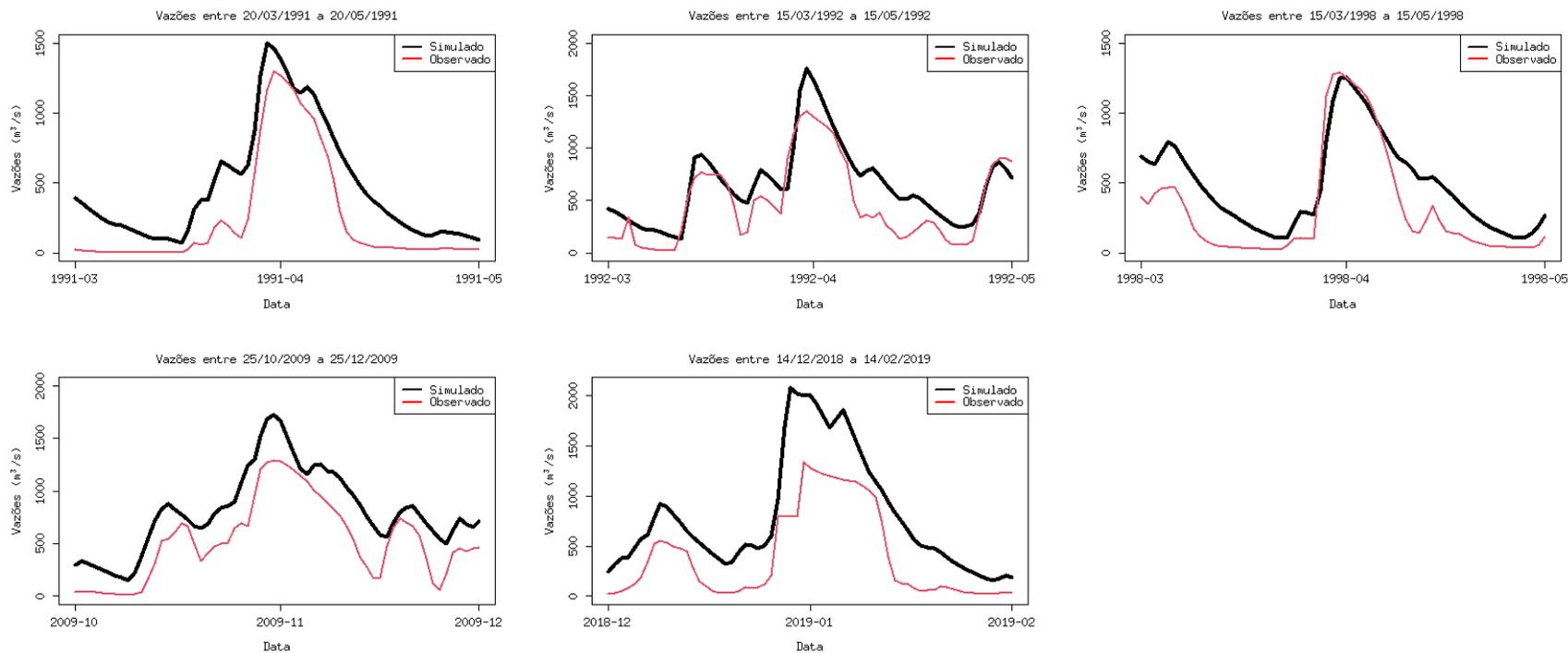
Tabela C1 - Resultados para os cinco eventos separadamente

Data	NS	R2
1991-03-20 a 1991-05-20	0,6119	0,9287
1991-02-20 a 1991-06-20	0,5243	0,8977
1991-01-20 a 1991-07-20	0,4436	0,8761
1992-03-15 a 1992-05-15	0,6544	0,8532
1992-02-15 a 1992-06-15	0,5866	0,7692
1992-01-15 a 1992-07-15	0,6081	0,8355
1998-03-15 a 1998-05-15	0,6312	0,8394
1998-02-15 a 1998-06-15	0,3741	0,7236
1998-01-15 a 1998-07-15	0,4588	0,7728
2009-10-25 a 2009-12-25	0,3654	0,8872
2009-09-25 a 2010-01-25	0,1811	0,8721
2009-08-25 a 2010-02-25	0,5662	0,8792
2018-12-14 a 2019-02-14	0,1321	0,8876
2018-11-14 a 2019-03-14	0,1227	0,8784
2018-10-14 a 2019-04-14	0,0983	0,8796

Fonte: Autor (2024).

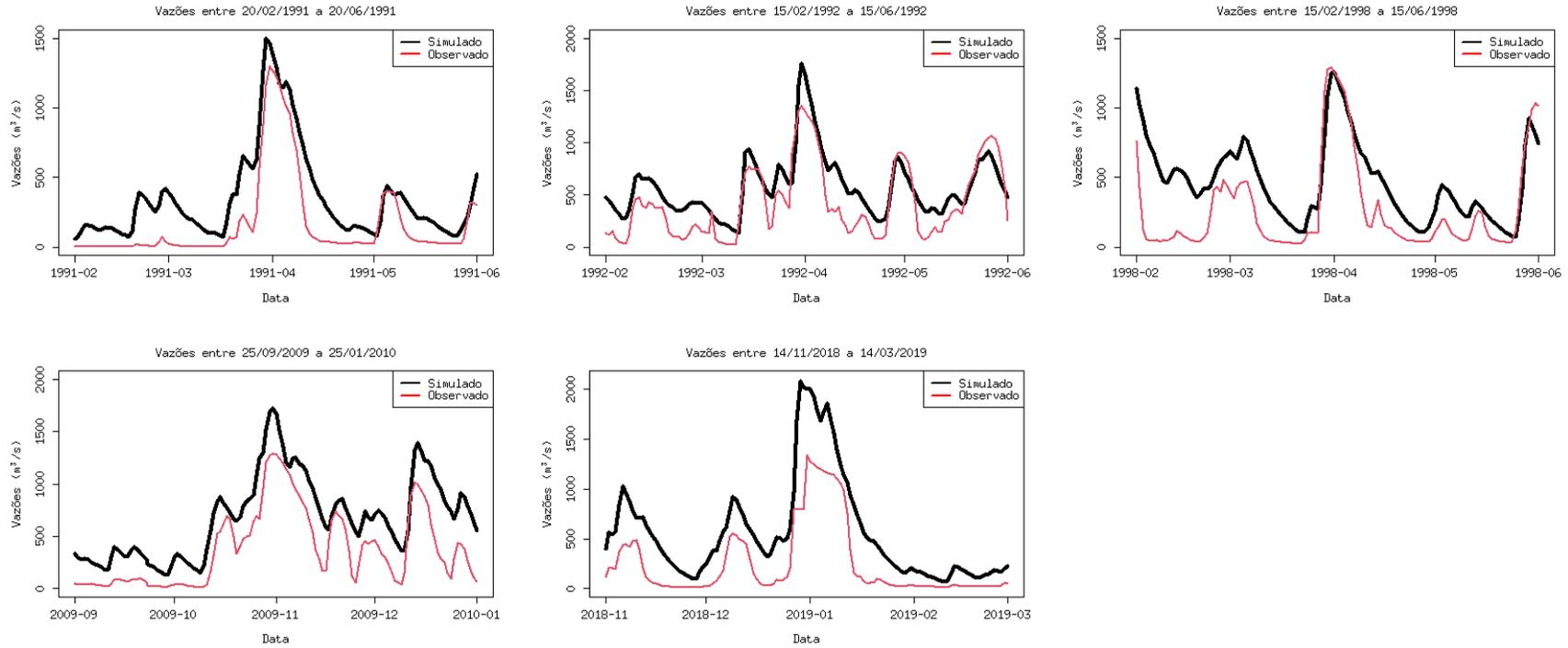
ANEXO D – REPRESENTAÇÃO DOS GRÁFICOS PARA OS EVENTOS DA SÉRIE HISTÓRICA

Figura D1 - Gráficos das vazões observadas para o período de dois meses



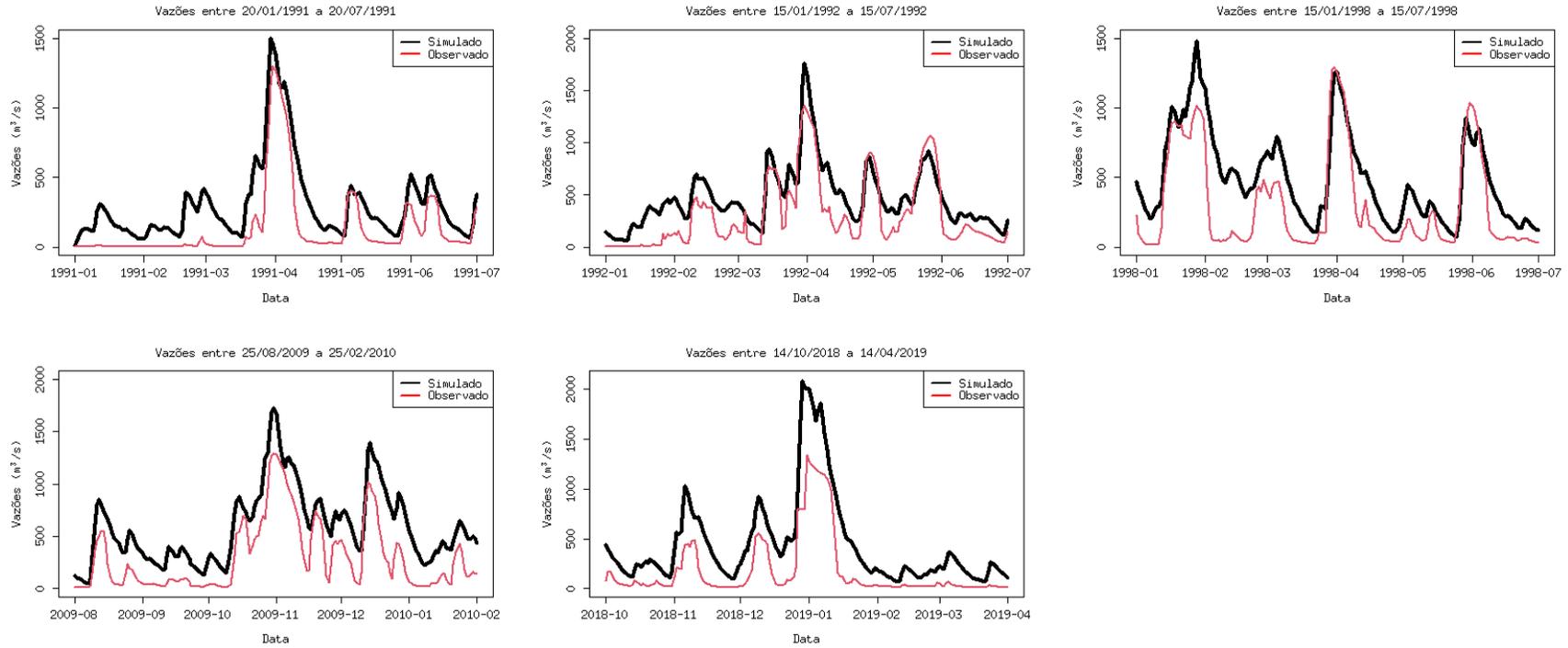
Fonte: Autor (2024).

Figura D2 - Gráficos das vazões observadas para o período de quatro meses



Fonte: Autor (2024).

Figura D3 - Gráficos das vazões observadas para o período de seis meses



Fonte: Autor (2024).