



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil

Marina da Silva Reis Assis

MODELAGEM DE ESCOAMENTO PERMANENTE E UNIFORME DO RIO ITABIRITO USANDO O HEC-RAS

Ouro Preto

2024

Modelagem de escoamento permanente e uniforme do rio Itabirito usando o HEC-
RAS

Marina da Silva Reis Assis

Trabalho Final de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Engenharia Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 23/02/2024

Área de concentração: Recursos Hídricos

Orientadora: Prof^a. M.Sc. Maria Luíza Teófilo Gandini – UFOP

Ouro Preto

2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A848m Assis, Marina da Silva Reis.

Modelagem de escoamento permanente e uniforme do rio Itabirito usando o HEC-RAS. [manuscrito] / Marina da Silva Reis Assis. - 2024. 75 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Ma. Maria Luíza Teófilo Gandini.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Itabirito, Rio (MG). 2. Hidráulica - Modelagem. 3. Inundações. 4. Geometria. 5. Hydrologic Engineering Center (HEC-RAS) - Software. 6. Vazões naturais. I. Gandini, Maria Luíza Teófilo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.01

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Marina da Silva Reis Assis

Modelagem de escoamento permanente e uniforme do rio Itabirito usando o HEC-RAS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Civil

Aprovada em 23 de fevereiro de 2024

Membros da banca

Ma. Maria Luíza Teófilo Gandini - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Dra. Aline de Araújo Nunes - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Carlos Eduardo Ferraz de Mello - Universidade Federal de Ouro Preto

Maria Luíza Teófilo Gandini, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 18/07/2024



Documento assinado eletronicamente por **Maria Luíza Teófilo Gandini**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/07/2024, às 15:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Eduardo Ferraz de Mello**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/07/2024, às 16:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Aline de Araujo Nunes**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/08/2024, às 15:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0743148** e o código CRC **FF0ED5B6**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar forças para completar essa jornada.

Aos meus pais, Maria Helena e Romero, e à minha irmã Vanessa por todo apoio e carinho.

À Maria Luíza pela orientação e dedicação na realização deste trabalho.

À Defesa Civil de Itabirito pela disponibilização da mancha de inundação observada no município.

Aos professores do DECIV, à UFOP e ao PET Civil.

E a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para minha formação.

Muito obrigada!

RESUMO

Inundações são problemas recorrentes em regiões que apresentam períodos com chuvas intensas. Suas consequências podem ser intensificadas quando se tem parcela da população habitando áreas ribeirinhas ou quando a urbanização ao seu redor é grande e mal planejada. O município de Itabirito é frequentemente atingido por esses eventos. Nesse sentido, o presente trabalho visa a obtenção da mancha de inundação do rio Itabirito, por meio de modelagem hidráulica tendo como base as vazões do rio para diferentes tempos de retorno, e a análise da área por ela atingida. Para sua realização utilizou-se o *software* HEC-RAS e dados de vazão retirados do site HidroWeb, as análises feitas são para os tempos de retorno de 2, 10, 25, 50 e 100 anos, obtidos pela distribuição log-Normal, e adotou-se o regime de escoamento permanente. A utilização de apenas uma estação com valores de vazão se deu pela falta de dados das demais estações procuradas e a escolha da distribuição log-Normal teve como base os resultados do teste Kolmogorov-Smirnov, no qual o p-valor encontrado foi de 0,9586. Apesar das simplificações adotadas, número de Manning igual a 0,045 e seção transversal única em toda a extensão do rio (escoamento uniforme), os resultados demonstram que parte considerável da cidade é afetada pela inundação, sendo a área atingida variando de, aproximadamente, 167.000 a 225.000 m² para os diferentes tempos de retorno analisados. Existem técnicas de controle de inundações que podem ser implementadas para a diminuição de ocorrências desses eventos e dos impactos causados por eles. Por isso, é imprescindível a elaboração de estudos mais aprofundados com relação a esses métodos de controle para se ter uma melhor percepção de qual é a melhor abordagem para a minimização desses eventos na cidade, pensando na aplicabilidade de cada um deles e seu impacto no município.

Palavras-chaves: Rio Itabirito, Modelagem Hidráulica, Inundações, Criação de geometria, HEC-RAS, Vazões.

ABSTRACT

Floods are recurring problems in regions that experience periods of heavy rainfall. Their consequences can intensify when part of the population lives in riverside areas, or the surrounding urbanization is extensive and poorly planned. The city of Itabirito is frequently affected by these events. In this sense, this study aims to obtain the floodplain of the Itabirito river, through hydraulic modeling based on the river flows for different return times, and to analyze the affected area. The HEC-RAS software and the flow data taken from the HidroWeb website were used to perform the study. The analysis was made for the return times of 2, 10, 25, 50, and 100 years, obtained by the log-Normal distribution, and the permanent flow regime was adopted. The use of only one station with flow values was due to the lack of data from the other stations searched, and the choice of the log-Normal distribution was based on the results of the Kolmogorov-Smirnov test, in which the p-value found was 0.9586. Despite the simplifications adopted, Manning's number equals 0.045, and a single cross-section along the entire length of the river (uniform flow), the results show that a considerable part of the city is affected by the flood, with the impacted area varying from approximately 167,000 to 225,000 m² for the different return times analyzed. Flood control techniques can be implemented to decrease the occurrences of these events and the impacts they cause. Therefore, it is essential to develop in-depth studies regarding these control methods to perceive better the best approach to minimize these events in the city, thinking about the applicability of each of them and their impact on the municipality.

Keywords: Itabirito River, Hydraulic Modeling, Floods, Geometry Creation, HEC-RAS, Flows.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Inundação em Itabirito – MG causada pelo transbordamento do córrego Carioca em 2022 (FÓRNEAS, 2022).	2
Figura 2 – Diferença da ocupação do rio em enchentes e inundações (CEMADEN, 2016).	3
Figura 3 – Mapa de localização do município de Itabirito (AUTORA, 2024).	13
Figura 4 – Precipitação e temperaturas do município de Itabirito no ano de 2022 (METEOBLUE, 2023).	15
Figura 5 – Fluxograma da relação de estações de interesse com as que tinham dados gerais e dados de vazão (AUTORA, 2024).	16
Figura 6 – Reportagem do jornal Gazeta de Itabirito sobre enchente de 1997 (SOU NOTÍCIA, 2022b).	28
Figura 7 – Ajuste vazões para distribuição Log-Normal (AUTORA, 2024).	29
Figura 8 – Ajuste vazões para distribuição Pearson Tipo III (AUTORA, 2024). ...	29
Figura 9 – Ajuste vazões para distribuição Log-Pearson Tipo III (AUTORA, 2024).	30
Figura 10 – Ajuste vazões para distribuição Gumbel Teórica (AUTORA, 2024). ...	30
Figura 11 – Ajuste vazões para distribuição Gumbel Finita (AUTORA, 2024). ...	31
Figura 12 – Localização da bacia do rio Itabirito na bacia do rio das Velhas (AUTORA, 2024).	35
Figura 13 – Localização da estação 41180000 e do trecho do rio utilizado na modelagem (AUTORA, 2024).	36
Figura 14 – Geometria do rio (AUTORA, 2024).	37
Figura 15 – Perfil da seção transversal, incluindo a calha do rio, disponibilizado pelo HEC-RAS (AUTORA, 2024).	38
Figura 16 – Seção transversal, incluindo a calha do rio, em escala igual para X e Y (AUTORA, 2024).	39

Figura 17 – Identificação das vazões de cada tempo de retorno no HEC-RAS (AUTORA, 2024).	40
Figura 18 – Condições de contorno aplicadas às seções transversais (AUTORA, 2024).	40
Figura 19 – Resultado da simulação na seção 7677 para o Tr de 2 anos (AUTORA, 2024).	41
Figura 20 – Resultado da simulação na seção 7677 para o Tr de 10 anos (AUTORA, 2024).	42
Figura 21 – Resultado da simulação na seção 7677 para o Tr de 25 anos (AUTORA, 2024).	42
Figura 22 – Resultado da simulação na seção 7677 para o Tr de 50 anos (AUTORA, 2024).	43
Figura 23 – Resultado da simulação na seção 7677 para o Tr de 100 anos (AUTORA, 2024).	43
Figura 24 – Trecho da Rua Dr. Guilherme atingido pela inundação de 2012 no município de Itabirito (AGITOMAS, 2012).	44
Figura 25 – Mancha de inundação do rio Itabirito para (a) o Tr de 2 anos e (b) o Tr de 10 anos (AUTORA, 2024).	45
Figura 26 – Mancha de inundação do rio Itabirito para (a) o Tr de 25 anos e (b) o Tr de 50 anos (AUTORA, 2024).	46
Figura 27 – Mancha de inundação do rio Itabirito para o Tr de 100 anos (AUTORA, 2024).	47
Figura 28 – Presença de água na seção 5442 para os diferentes tempos de retorno (AUTORA, 2024).	48
Figura 29 – Presença de água na seção 9597 para os diferentes tempos de retorno (AUTORA, 2024).	48
Figura 30 – Presença de água na seção 9676 para os diferentes tempos de retorno (AUTORA, 2024).	49

Figura 31 – Presença de água na seção 9859 para os diferentes tempos de retorno (AUTORA, 2024).	49
Figura 32 – Visualização 3D do terreno e da mancha de inundação para o Tr de 100 anos (AUTORA, 2024).	50
Figura 33 – Proporção do município atingida pela mancha de inundação para o Tr de 100 anos (AUTORA, 2024).	51
Figura 34 – Mancha de inundação observada e disponibilizada pela Defesa Civil do município de Itabirito (DEFESA CIVIL DE ITABIRITO, 2024).	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de D_{crit} no teste KS (NAGHETTINI & PINTO, 2007).	21
Tabela 2 – Valores do coeficiente de rugosidade da fórmula de Manning para arroios e rios (PORTO, 2008).....	26
Tabela 3 – p-valores encontrados para as diferentes distribuições (AUTORA, 2024).	32
Tabela 4 – Valores da vazão para diferentes tempos de retorno (AUTORA, 2024).	32
Tabela 5 – Valores da vazão calculados e observados para diferentes tempos de retorno (AUTORA, 2024).....	34

LISTA DE SIGLAS

ASCE – *American Society of Civil Engineers*

CNEPA – Centro Nacional de Ensino e Pesquisas Agronômicas

HEC-RAS – *Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*

HEC-HMS – *Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDE-Sisema – Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio
Ambiente e Recursos Hídricos

KS – Kolmogorov-Smirnov

NRCS – *Natural Resources Conservation Service*

OMM – Organização Meteorológica Mundial

RHN – Rede Hidrometeorológica Nacional

SCS – *Soil Conservation Service*

Tr – Tempo de Retorno

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	2
1.1.1	Objetivos específicos	2
2	Revisão Bibliográfica.....	3
2.1	Inundações	3
2.1.1	Causas das inundações	3
2.1.2	Consequências das inundações.....	4
2.1.3	Controle das inundações.....	5
2.2	Caracterização da região	6
2.2.1	Pedologia	6
2.2.2	Uso e ocupação do solo	7
2.2.3	Clima	8
2.3	Modelagem hidráulica.....	9
2.4	Software HEC-RAS.....	11
3	Metodologia	13
3.1	Caracterização da área de estudo	13
3.1.1	Município	13
3.1.2	Clima e precipitação	14
3.2	Dados de vazões	15
3.2.1	Análise dos dados	16
3.2.2	Identificação da distribuição teórica de probabilidade	18
3.3	Delimitação do trecho de rio	23

3.4	Criação da geometria do rio.....	24
3.5	Simulação hidráulica.....	25
4	Resultados.....	27
4.1	Confiabilidade dos dados.....	27
4.2	Análise das distribuições	28
4.3	Delimitação do trecho de rio	34
4.4	Geometria do rio Itabirito	37
4.5	Simulação hidráulica.....	39
5	Conclusão	55
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	56
	Referências.....	57
	APÊNDICE A	64
	APÊNDICE B	67
	APÊNDICE C	70

1 INTRODUÇÃO

As inundações e enchentes são problemas encontrados frequentemente nos noticiários, mais especificamente nos períodos chuvosos. Segundo Tucci (2003) existem dois grandes motivos que desencadeiam a ocorrência de enchentes em regiões urbanas, são eles: a urbanização e a ocupação de áreas ribeirinhas. Para o último caso o que pode ser feito para minimizar sua ocorrência é realocação da população que habita essas regiões, pois o processo de enchente é natural já que o rio tende a ocupar seu leito maior quando ocorrem chuvas com tempos de retorno maiores. O problema torna-se complexo visto que, segundo o mesmo autor, a parcela populacional que reside em regiões ribeirinhas é aquela com pouco recurso e, muitas vezes, sem opção de habitar outros lugares.

Quando se trata das enchentes como consequência da urbanização tem-se que ela é amplamente influenciada pelas impermeabilizações do solo advindas de calçadas, telhados, asfaltos etc. Isso porque parte da quantidade de água que infiltraria no solo passa a ser escoada superficialmente, exigindo mais dos componentes de drenagem da bacia em questão (TUCCI, 2003).

As consequências desse processo são percebidas nos casos de enchentes divulgados pelos canais de comunicação. Um exemplo é a inundação que ocorreu em novembro de 2022 no município de Itabirito – MG devido ao transbordamento do córrego Carioca, como mostra a Figura 1 (FÓRNEAS, 2022). Essa não foi a primeira vez que ocorreu um evento desse tipo, situações de enchente no município em questão são frequentes, mesmo que não sejam em intensidades elevadas como a citada, que segundo Estrela (2022) foi a pior já vista no município.

A cidade de Itabirito está situada na região sudeste do Brasil e teve seu processo de urbanização interligado à exploração de ouro na região a partir do século XVII (PREFEITURA ITABIRITO, s.d.), sendo sua formação dada com a construção dos primeiros templos religiosos, que indicam o direcionamento desse processo (CLÍMACO, 2011). Além disso, Rodrigues (2019) aponta que o crescimento da cidade ocorreu como nas civilizações antigas, seguindo a rede hídrica da região, o que

justifica o elevado número de construções perto dos rios da cidade, especialmente do rio Itabirito.

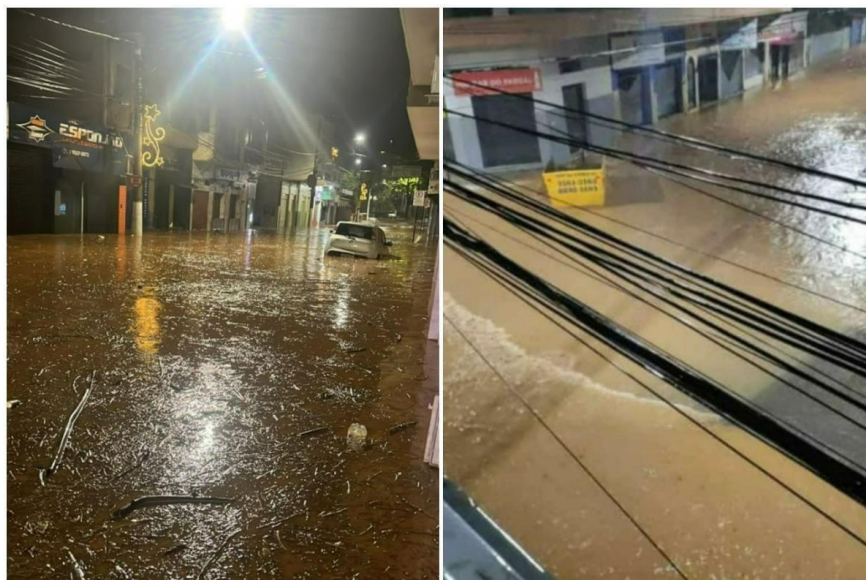


Figura 1 – Inundação em Itabirito – MG causada pelo transbordamento do córrego Carioca em 2022 (FÓRNEAS, 2022).

1.1 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é mapear as áreas susceptíveis à inundação do rio Itabirito, localizado na cidade de mesmo nome do rio.

1.1.1 Objetivos específicos

De forma, a se alcançar o objetivo ao final do trabalho, têm-se alguns objetivos específicos para serem atingidos:

1. caracterização hidráulica do trecho do rio em estudo;
2. obtenção da vazão de pico para os tempos de retorno de 2, 10, 25, 50 e 100 anos e
3. identificação das regiões susceptíveis à inundação para cada tempo de retorno.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Inundações

As inundações ocorrem quando um rio passa a ocupar áreas além do seu leito maior (SANTOS JUNIOR e SANTOS, 2013), e, por se tratar de um evento que extrapola os limites do rio não deveria ocorrer com tamanha frequência, apenas em situações de precipitações extremas, que geralmente estão vinculadas a grandes períodos de retorno. Apesar de serem conceitos diferentes, muito se usa a palavra “enchente” para falar do mesmo acontecimento. No entanto, enchentes ocorrem quando o rio ocupa o seu leito maior, o que é normal, visto que seu volume pode variar ao longo do ano devido à sazonalidade das precipitações. A Figura 2 mostra como se dá a ocupação do rio nas duas situações.

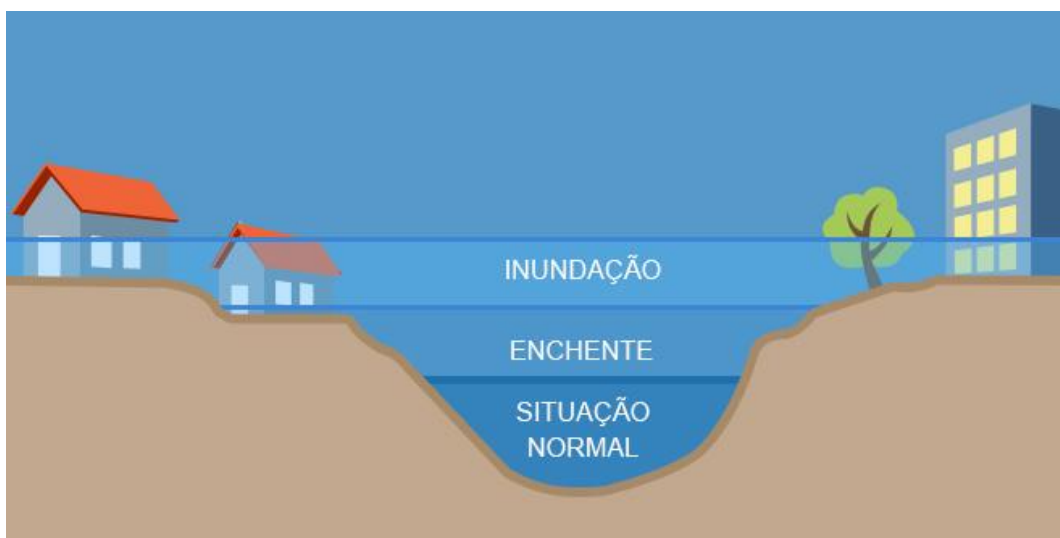


Figura 2 – Diferença da ocupação do rio em enchentes e inundações (CEMADEN, 2016).

2.1.1 Causas das inundações

Tendo-se entendido qual é o conceito de inundações, vê-se necessário compreender os motivos de sua ocorrência. Para Tucci (2003), esse tipo de evento se

dá pela combinação do comportamento dos rios e das alterações no ambiente realizadas pelos seres humanos, como impermeabilização das superfícies e a canalização de rios.

O mesmo autor classifica as inundações em: inundação ribeirinha e inundação devido à urbanização. A primeira, são as descritas nesse estudo como enchente e ocorrem quando o rio, por causa do extrapolamento de seu volume convencional, ocupa áreas ao seu entorno (leito maior). Elas são causadas por eventos climáticos da região e afetam a população de forma mais direta se houver ocupação nesses locais, o que não é indicado.

Já as inundações devido à urbanização são advindas da impermeabilização da superfície, seja por telhados, asfalto, calçadas ou outros meios. Isso impede que a água seja infiltrada, gerando um aumento do escoamento superficial, o que solicita mais os componentes de drenagem, que nem sempre são projetados para suportar tamanha solicitação.

2.1.2 Consequências das inundações

De acordo com a Organização Meteorológica Mundial (OMM), as ocorrências de inundações tiveram um incremento de mais de 130% desde o início do século XXI. Juntamente com esse aumento, vêm os impactos causados por ele, que vão desde a destruição de bens materiais (infraestrutura, automóveis, moradias etc.) à da biodiversidade e das plantações, por exemplo (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2022).

O contato das águas provenientes das inundações pode, também, influenciar questões sanitárias da região. Cólera, leptospirose, tétano e hepatite A são exemplos de doenças de possível transmissão pelo contato com água contaminada, assim como pode-se encontrar, nessas situações, animais peçonhentos (MINISTÉRIO DA SAÚDE, s.d.).

Outro fator de extrema importância, senão o principal, ao se tratar de inundações, é o impacto causado por elas na vida humana. Mais do que a possibilidade de deixar parte da população desabrigada e sem local de trabalho, elas ainda podem ser as causadoras da perda de vidas. Kobiyama et al. (2006) trazem que, a partir de dados

analisados pelos autores, as inundações são o principal desastre natural causador de perdas de vidas humanas, e, de acordo com Decina (2012), elas são as causadoras de 21% das mortes devido a desastres naturais desde 1900. Para o mesmo autor, no Brasil, os dados mostram que esses eventos são responsáveis por 64% dos desastres naturais ocorridos e 83% dos falecimentos registrados a partir de 2000. Assim, além de uma questão sanitária e de perdas materiais, as inundações representam um problema humanitário.

2.1.3 Controle das inundações

Tucci (2003) classifica as medidas de controle de inundações de acordo com a ação que elas exercem na bacia hidrográfica. Elas podem ser:

- distribuída ou na fonte: atuam diretamente no lote, ou seja, em calçadas, praças, ruas, telhados etc.;
- na microdrenagem: relacionada a ação sobre o hidrograma oriundo de um pequeno conjunto de loteamentos que são analisados coletivamente e
- na macrodrenagem: diz respeito à drenagem dos rios localizados na região urbana que está sendo levada em consideração.

Com relação à forma que são implantadas, tem-se que as medidas podem ser estruturais ou não estruturais. Todas as formas de conscientização da população e execução de leis, regulamentos, normas e programas que visam a diminuição dos danos causados pelas inundações são medidas não estruturais. Por outro lado, as medidas estruturais são as obras de engenharia que objetivam a redução dos casos de inundações; estas são subdivididas em intensivas (aceleração do escoamento, canalização e obras correlatas, retardamento de fluxo – bacias de retenção e retenção, restauração de calhas – e ações que tendem impedir que as edificações sejam atingidas) e extensivas (pequenos armazenamentos espalhados pela bacia, recomposição da cobertura vegetal e controle de erosão do solo) (CANHOLI, 2005).

2.2 Caracterização da região

Para compreender a forma como as situações ocorrem em determinada localidade é importante saber quais são as características que podem ter influência naquilo que está sendo analisado. Aspectos importantes são: pedologia, uso e ocupação do solo e clima.

2.2.1 Pedologia

No Brasil, o estudo dos diferentes solos presentes no território nacional vem sendo realizado desde a década de 1950, tendo os primeiros levantamentos realizados pela Comissão de Solos do Centro Nacional de Ensino e Pesquisas Agronômicas (CNEPA). Entre 1980 e 1997 foram publicadas as primeiras versões do Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos, nas quais estava discriminado como se dava a classificação do solo brasileiro (SANTOS et al., 2018).

Outras edições desse documento já foram lançadas desde então, e em sua 5ª edição (SANTOS et al., 2018) os solos estão divididos em 6 níveis: Ordens, Subordens, Grandes grupos, Subgrupos, Famílias e Séries. Destaca-se que o primeiro nível categórico é aquele mais conhecido pelas pessoas, no qual as nomenclaturas possuem o sufixo “-solo”, sendo elas: Argissolo, Cambissolo, Chernossolo, Espodossolo, Gleissolo, Latossolo, Luvissolo, Neossolo, Nitossolo, Organossolo, Planossolo, Plintossolo e Vertissolo.

O tipo de solo encontrado em uma determinada região influencia diretamente aspectos relacionados às inundações (MAGALHÃES et al., 2011). Isso porque solos com mais espaços entre as partículas, como solos arenosos, permitem uma maior absorção de água. A capacidade drenante de um solo diz respeito à quantidade de água que ele possibilita que seja infiltrada, quanto menor ela for, maior será o escoamento superficial nele. Esse fator tem relação direta com o dimensionamento dos componentes de drenagem, já que estes auxiliam a mitigação do problema de inundações.

2.2.2 Uso e ocupação do solo

No Brasil, as condições de uso e ocupação do solo são monitoradas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O Manual Técnico de Uso da Terra (2013) apresenta todo o histórico de como é feita a análise desse quesito de forma a entender como o solo está sendo ocupado no território brasileiro.

Segundo o mesmo manual, para que se tenham informações adequadas sobre o uso e a ocupação do solo, é preciso considerar alguns pontos, sendo eles:

- escala do mapeamento: depende do que se deseja mostrar com a representação e o nível de detalhamento esperado, as escalas podem variar de 1:50.000 a 1:2.500.000;
- natureza da informação básica: a informação base a ser utilizada pode advir de diferentes sensores, cada um com seu custo, dados englobados e característica técnica, como a resolução, que pode ser espacial, radiométrica, espectral ou temporal;
- unidade de mapeamento: diz respeito a homogeneidade ou diferença de objetos presentes na área que está sendo analisada; para fazer a definição da menor área a ser mapeada precisa-se considerar a escala do mapeamento, se é possível representar de forma realista as características do terreno e custo das atividades e
- nomenclatura utilizada: a nomenclatura tem que apresentar termos claros e precisos, de forma a evitar possíveis interpretações erradas, e ser apresentada em tamanho e fonte compatíveis com a escala do desenho.

Além disso, o IBGE (2022) classifica o uso e ocupação do solo em classes para elaborar as divisões das regiões. Elas são: área artificial, área agrícola, pastagem com manejo, ocupações em área florestal, silvicultura, vegetação florestal, área úmida, vegetação campestre, ocupações em área campestre, corpo d'água continental, corpo d'água costeiro e área descoberta.

A forma como se dá a ocupação local reflete como a região responde às questões naturais, como, por exemplo, o elevado volume de chuva. Magalhães et al. (2011) relacionam esse aspecto com o comportamento da água em casos de enchentes ao

comparar o nível de escoamento superficial entre uma área impermeabilizada e uma com cobertura vegetal, sendo a intensidade maior na primeira do que na segunda. Isso se deve não só ao material que cobre a superfície, que dificulta ou facilita a infiltração, mas também ao fato de que a vegetação auxilia a diminuição do volume de água e da sua velocidade ao atingir o solo, visto que ocorre retenção de uma parcela. Com a retirada da cobertura vegetal, essa água alcança o solo com mais impacto e chega aos componentes de drenagem e aos canais principais mais rápido, situação propícia para a ocorrência de inundações (DECINA, 2012).

2.2.3 Clima

Clima é um conjunto de fatores relacionados com as características das estações do ano, temperaturas e chuvas, que são influenciados pela altitude da localidade, distância dos mares e posição geográfica no globo em relação à linha do Equador, sendo a média das condições do tempo ao longo de décadas (DIAS e SILVA, 2009).

Para caracterizar uma localidade de acordo com o clima, é preciso definir como os fatores influentes serão relacionados entre si, dentre eles tempo, espaço e fluxo de matéria e energia. Segundo Ribeiro (1993), podem ser identificadas três categorias, que são:

- nível macroclimático: analisa aspectos mais amplo, engloba a Terra como um todo;
- nível mesoclimático: áreas não muito extensas, como regiões urbanas, nas quais estuda-se o comportamento em situações de eventos climáticos expressivos (temporais, enchentes etc.) e
- nível microclimático: clima mais próximo à superfície terrestre e/ou em pequenas extensões (menores que 100 metros).

A forma de análise do clima irá intervir na caracterização realizada. Assim, deve-se saber em qual amplitude será a avaliação para ter conhecimento de como pode ser a interferência dele nos resultados a serem obtidos.

Regiões com climas chuvosos, como o equatorial e o tropical, precisam estar preparados para lidar com elevados volumes de água em épocas comuns de

ocorrerem essas chuvas. Desastres naturais relacionados à quantidade de água, inundações e deslizamentos de terra, são relatados com maior frequência nessas localidades e por isso, elas devem se adaptar para suprir suas necessidades e diminuir o impacto desses eventos, bem como a frequência deles.

Outro fator que precisa ser levado em consideração ao associar o clima de uma região com algum parâmetro é a influência que as mudanças climáticas podem causar. Esse é um assunto de discussão mundial e de extrema importância, visto que os impactos dessas mudanças podem ser diferentes a depender da região analisada, como mostram Groisman et al. (2005). Além do mais, a frequência de ocorrência de eventos extremos vem aumentando nas últimas décadas quando se analisam dados de precipitação, e essa ocorrência tende a se fazer presente no futuro, podendo até mesmo se mostrar mais drástica ao passar do tempo.

Na parte subtropical do Brasil, considerando a região mais populosa de São Paulo, foi identificado um aumento de precipitações extremas desde 1940 (GROISMAN et al., 2005). O mesmo estudo também mostra que o El Niño e o La Niña influenciam a variação de precipitação nas regiões onde se pode sentir os efeitos desses eventos. E em Gandini (2016), há uma análise dos efeitos das mudanças climáticas em uma bacia hidrográfica brasileira, localizada em Cunha – SP, no qual foi possível inferir uma diminuição da frequência das precipitações extremas na região, baseado em projeções climáticas para a localidade de estudo.

Dessa forma, é importante o conhecimento não só de como é o clima da região em que será feita alguma análise, como também dos impactos e possíveis consequências das mudanças climáticas, considerando o que vem sendo retratado e observado com o decorrer do tempo.

2.3 Modelagem hidráulica

Para a *American Society of Civil Engineers*, ASCE, (2000), a modelagem hidráulica é um modelo físico de simulação comumente utilizado para a determinação de questões relacionadas à operação e ao *design* em problemas de engenharia hidráulica. Nesse sentido, ela não pode ser considerada uma ferramenta nova, já que

antes da popularização do uso de computadores ela já era utilizada durante a criação de projetos hidráulicos, como relatado em Dezotti (2023).

Os modelos hidráulicos permitem que resultados acerca de manchas de inundação sejam obtidos. Isso ocorre a partir de dados geométricos e hidráulicos da área estudada, sendo que os modelos podem simular o regime de escoamento permanente como o não permanente (ENOMOTO, 2004), assim como o regime uniforme ou o não uniforme.

A diferença entre um regime de escoamento permanente e um não permanente se dá pela variação ou não das grandezas (velocidade, profundidade e vazão, por exemplo) em um determinado ponto em relação ao tempo (MARTINS, 1997). Pensando em uma análise de um canal em que será utilizada a sua vazão para se obter os resultados, como é o caso deste trabalho, o escoamento permanente é aquele em que é considerado, para cada ponto do espaço, o mesmo valor de vazão em todos os instantes da modelagem.

Por outro lado, no escoamento não permanente, é preciso gerar um hidrograma para os dados de vazão, ele é então associado a um determinado ponto do curso d'água. Esse método gera resultados mais realistas, visto que um rio não trabalha com vazões idênticas ao longo do tempo, pois pode existir, por exemplo, a contribuição do escoamento superficial direto em decorrência de uma chuva.

Sobre os regimes uniforme e não uniforme, tem-se que, quando todas as seções transversais do conduto são iguais e a velocidade média é constante em todas essas seções em um determinado instante, o escoamento é considerado uniforme. E se a velocidade variar de ponto a ponto em um instante qualquer, o escoamento é considerado não uniforme (PORTO, 2008).

Enomoto (2004), comprovando a definição dada pela ASCE (2000), descreve que os modelos hidráulicos utilizam a leis básicas da mecânica dos fluidos que regem o escoamento da água. Outra aplicação da modelagem hidráulica é relacionada a questões de drenagem, como retratar as vazões em função do tempo para a qual o sistema é projetado (LUZ, 2021).

Outro fator importante para se obter uma boa modelagem é a escolha do modelo a ser utilizado. Aspectos como área determinada, tipos de dados disponíveis e familiaridade com o programa de simulação utilizado são essenciais para a realização dessa escolha (ANDRADE, 2017). É imprescindível o conhecimento destes tópicos para a interpretação dos resultados, porque é com base neles que será feita uma avaliação daquilo que foi gerado, ou seja, julgar se o resultado é coerente ou não.

A topografia é um dos elementos necessários para a execução desses modelos, bem como o conhecimento das seções transversais de um rio, por exemplo, e outros dados hidráulicos e hidrológicos, que podem ser de difícil acesso (GALL, BORUFF, CUTTER, 2007). Assim, é preciso adotar simplificações plausíveis e uma boa escolha de modelo para a realização da simulação.

2.4 Software HEC-RAS

O *software* HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*) possui várias aplicabilidades na análise de modelagem hidráulica, tanto em regime permanente quanto em regime não permanente, simula escoamento subcrítico, supercrítico ou misto e uni ou bidimensional. O programa também possibilita o cálculo de transporte de sedimentos e análise de qualidade da água (USACE, s.d.). No programa, o escoamento não permanente é regido pelas equações de Saint Venant, pelo método de diferenças finitas implícito, enquanto o regime permanente segue a equação da energia unidimensional (GANDINI, 2014).

Os passos, de acordo com USACE (s.d.), para a criação de uma modelo hidráulico no HEC-RAS são:

1. iniciar novo projeto;
2. inserir dados geométricos;
3. inserir dados de fluxo e condições de limite;
4. realizar cálculos hidráulicos e
5. visualizar os resultados.

O *software* permite tanto a importação de dados de outros programas quanto a criação da geometria do rio em uma de suas ferramentas (RAS-Mapper), facilitando,

assim, ao usuário um melhor desenvolvimento do projeto a ser realizado. Para a utilização de dados referentes ao terreno e à elevação do modelo, é preciso estabelecer um sistema de coordenadas geoespaciais, de forma a garantir que todos os parâmetros considerados estejam em concordância com a referência geográfica utilizada (USACE, s.d.).

Andrade (2017) aborda algumas formas de utilização do programa por meio de outros estudos que fizeram uso deles em sua metodologia. As análises citadas pela autora demonstram que ele possui boa aplicabilidade e oferece bons resultados em diferentes situações, seja em regiões com áreas reduzidas (6.700 m²) ou mais extensas (14.000 m²), e com uso para a delimitação de regiões com possibilidade de serem inundadas, obtenção de manchas de inundação e reconstrução de eventos chuvosos, por exemplo.

Pontos positivos acerca do HEC-RAS, além do fato de estar disponível de forma gratuita, incluem a possibilidade de importação de dados de outros *softwares*, como QGIS e ArcGIS, bem como a utilização de imagens aéreas de satélite (Google Earth ou Google Maps) e, posteriormente, a fácil exportação dos resultados para os *softwares* citados. Além disso, em USACE (s.d.) existem manuais, treinamentos e explicações para a melhor forma de manusear o *software*, desenvolvidos pelos seus criadores. Espaços para sugestões e relatório de erros também estão disponíveis no site oficial, de forma a manter um contato com o usuário e permitir que a experiência utilizando este *software* seja a melhor possível.

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização da área de estudo

Para se fazer uma modelagem hidráulica de uma determinada bacia hidrográfica é necessário, primeiro, entender sobre a região em que ela se localiza. Assim, torna-se possível entender como esses fatores impactam a susceptibilidade à inundação da região em estudo.

3.1.1 Município

O rio Itabirito está localizado no município de Itabirito – MG, que se encontra na região central do estado e dista apenas 55 km da capital, Belo Horizonte (Figura 3). De forma aproximada, o centro de Itabirito está localizado nas seguintes coordenadas geográficas: 20°15'12" Latitude Sul e 43°48'05" Longitude Oeste, a 844 m acima do nível do mar, pelo referenciamento do *datum* SIRGAS 2000 (DRZ, 2013).

Localização do município de Itabirito

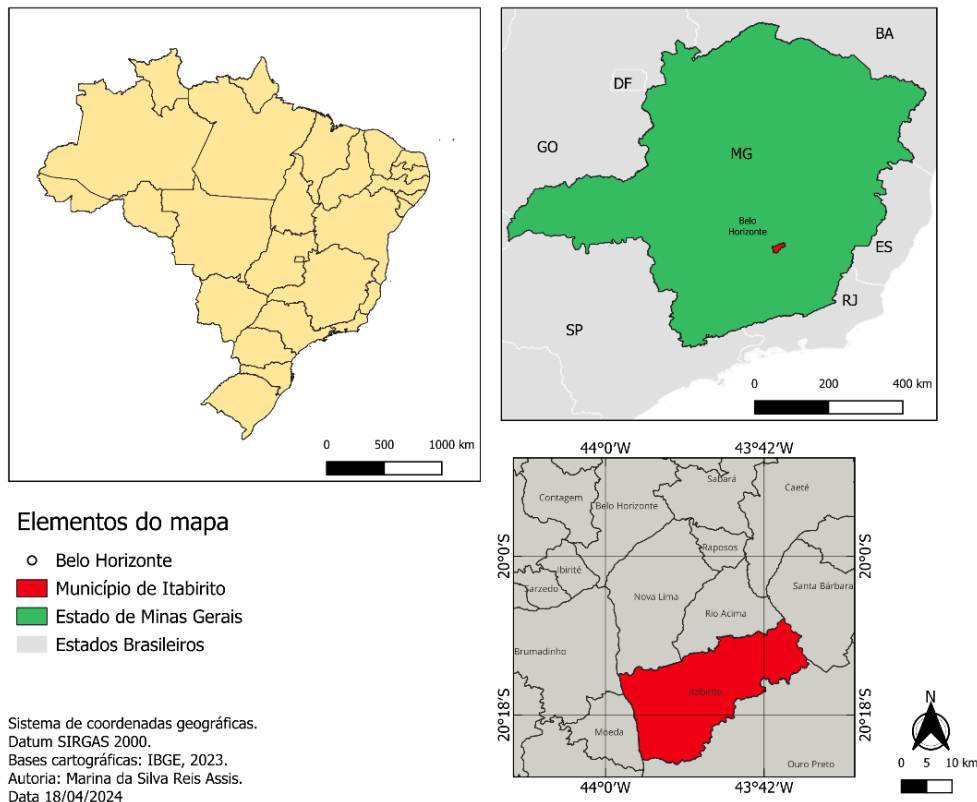


Figura 3 – Mapa de localização do município de Itabirito (AUTORA, 2024).

O rio Itabirito é o curso d'água principal da bacia do rio Itabirito que faz parte da bacia do rio das Velhas, que, por sua vez, pertence à bacia do rio São Francisco, sendo a principal do estado de Minas Gerais (MYSSIOR, 2013). Apesar do rio Itabirito não se localizar inteiramente no município de Itabirito, toda a extensão da cidade é cortada por ele, fazendo com que tenha grande influência nos casos de enchentes e inundações locais, que afetam os 53.282 habitantes espalhados pelos 544 km² de área do município (IBGE, 2023).

3.1.2 Clima e precipitação

A classificação de Köppen-Geiger é uma das mais utilizadas para diagnóstico ambiental e ela considera a sazonalidade, além da temperatura e precipitação média em intervalos mensais e anuais. Os tipos são descritos por 3 (três) caracteres, em que o primeiro representa um dos cinco grandes grupos climáticos (“A”, “B”, “C”, “D” ou “E”), enquanto o segundo e o terceiro indicam os subtipos (MYR, 2013a). Segundo o mesmo autor, seguindo essa classificação, a região do rio Itabirito se enquadra no tipo Cwa, significando que o clima é temperado ou temperado quente (C), com chuvas de verão (w) e verão quente (a).

De acordo com DHF (2016), o clima predominante na região da bacia do rio das Velhas que compreende o rio Itabirito é o Tropical de Altitude. Na região, a média de temperatura varia de 19°C a 27°C e a precipitação anual é em torno de 1.500 mm, sendo as chuvas concentradas no período do verão. A Figura 4 mostra a precipitação e as temperaturas máximas, médias e mínimas para o município de Itabirito no ano de 2022, e ela demonstra as características do clima da localidade.

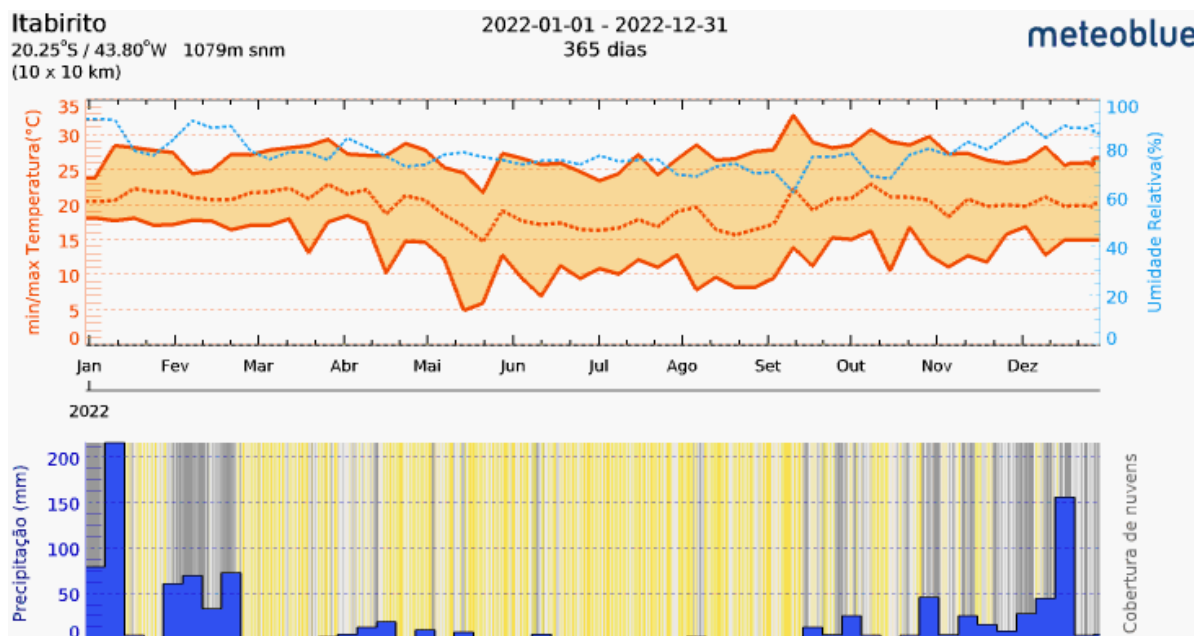


Figura 4 – Precipitação e temperaturas do município de Itabirito no ano de 2022 (METEOBLUE, 2023).

3.2 Dados de vazões

O HidroWeb é um portal público no qual são disponibilizados dados das medições da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) como vazões, chuvas, climatologia, níveis fluviais, qualidade da água e sedimentos (ANA, s.d.). Nele é possível baixar as séries históricas de diversas estações pluviométricas e fluviométricas do Brasil.

De forma a obter o maior número possível de dados, a coleta foi feita nas estações dispostas ao longo do rio Itabirito e de seus afluentes, como o córrego Carioca. Foram localizadas 15 (quinze) estações de interesse, cujos códigos são: 41170500, 41179000, 41179500, 41180000, 41180500, 41181100, 41185000, 41185300, 41185400, 41185450, 41185500, 41185550, 41185600, 41186000 e 41190000.

No entanto, apenas 9 (nove) dessas possuem algum tipo de dado disponível, que são as de código 41179000, 41180000, 41181100, 41185000, 41185300, 41185550, 41185600, 41186000 e 41190000. Os dados procurados eram referentes às vazões, e eles foram encontrados em duas estações, a 41180000 e a 41190000. Na primeira os registros são de junho de 1956 a maio de 2023, o que representa uma série

histórica consistente já que não havia períodos sem medições. Já a segunda, que contém dados de janeiro de 1926 a agosto de 1947, apresenta uma grande falha com relação à falta de medições entre os anos de 1931 e 1934; além disso, essa estação é referente a um afluente do rio Itabirito. Devido a essas considerações, optou-se por trabalhar apenas com a estação de número 41180000 (Itabirito Linígrafo), destacada em verde no fluxograma apresentado na Figura 5, e descartar a outra estação, que se encontra em vermelho na mesma figura, a qual mostra um fluxograma com a relação das estações pesquisadas e em quais delas obtiveram-se dados.

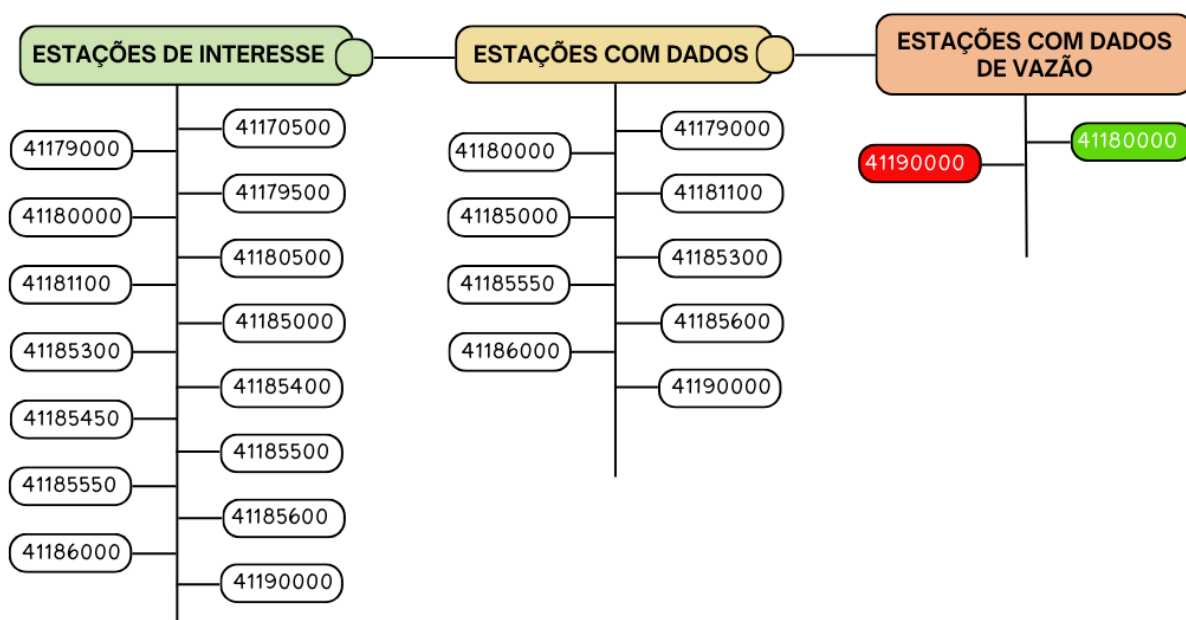


Figura 5 – Fluxograma da relação de estações de interesse com as que tinham dados gerais e dados de vazão (AUTORA, 2024).

3.2.1 Análise dos dados

Para realizar a análise dos dados referentes à estação 41180000, foi utilizado o *software* Excel, no qual as vazões máximas foram ordenadas em ordem cronológica e separadas por ano hidrológico, que na região Sudeste do Brasil tem seu início em outubro e término em setembro do ano civil seguinte, totalizando 66 anos hidrológicos. Em seguida, reordenaram-se as vazões máximas de cada ano hidrológico em ordem

crescente e calcularam-se a média e o desvio padrão da série. Para cada uma das vazões calculou-se o logaritmo natural, bem como a média e o desvio padrão dos logaritmos. Após isso, realizou-se uma análise para verificar se algum dos dados era considerado um *outlier* pelos métodos descritos a seguir e, em caso positivo, avaliou-se se era plausível ou não a retirada dele(s) da amostra.

De forma a investigar a confiabilidade dos dados, utilizaram-se o método de Grubbs (1969) e o de Grubbs e Beck (1972). Os *outliers* são dados numéricos extremos que comprometem o ajuste entre as distribuições empíricas e teóricas (GANDINI, 2016). No entanto, para realizar a exclusão de dados é preciso uma avaliação criteriosa, pois essa ação pode comprometer a análise que está sendo feita.

Seja uma amostra de N observações ordenadas de modo crescente $x_1 < x_2 < x_3 < \dots < x_N$, sendo x_N o maior valor e, portanto, aquele que tende a ser duvidoso. Os métodos são aplicados da seguinte forma:

- Grubbs (1969)

O critério de teste é dado por T_N pela equação:

$$T_N = \frac{(x_N - \bar{x})}{\sigma} \quad (1)$$

onde:

$\bar{x}$: média aritmética dos N valores;

σ : estimativa do desvio padrão da amostra, calculada com N-1 graus de liberdade.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (2)$$

Se ao invés do valor duvidoso ser o x_N , ele for o x_1 tem-se que o critério T_1 é dado por:

$$T_1 = \frac{(\bar{x} - x_1)}{\sigma} \quad (3)$$

O dado será considerado um *outlier* superior se $T_N > T_{cr}$ ou um *outlier* inferior se $T_1 > T_{cr}$. Nas duas situações, os valores críticos, T_{cr} , são tabelados para os níveis de significância que variam de 0,1% a 10%.

- Grubbs e Beck (1972)

Nesse teste existem duas fórmulas para a identificação dos *outliers*

$$x_H = \exp(\bar{x} + k_N \sigma) \quad (4)$$

$$x_L = \exp(\bar{x} - k_N \sigma) \quad (5)$$

Nas quais

$\bar{x}$: média aritmética dos N valores;

σ : desvio padrão da série de dados;

k_N : estatística Grubbs e Beck tabulada para diversos tamanhos de amostra e nível de significância.

Será considerado um *outlier* caso o valor da amostra seja maior que x_H (*outlier* superior) ou menor que x_L (*outlier* inferior).

3.2.2 Identificação da distribuição teórica de probabilidade

Existem algumas distribuições estatísticas, embora não muitas, que conseguem descrever processos hidrológicos com determinada precisão. Para Naghettini & Pinto (2007), poucos são os eventos que não podem ser explicados pelos processos determinísticos que regem essas distribuições. Dentre elas, nesse trabalho foram utilizadas a Log-Normal, Pearson Tipo III, Log-Pearson Tipo III, Gumbel Teórica e Gumbel Finita.

Com os dados ordenados em ordem decrescente e enumerados, calculou-se a probabilidade de excedência e de não excedência, respectivamente, pelas fórmulas:

$$P\{Q \geq Q_0\} = \frac{m}{N + 1} \quad (6)$$

$$P\{Q \leq Q_0\} = 1 - P\{Q \geq Q_0\} \quad (7)$$

Sendo que N representa o tamanho da amostra e m faz referência a numeração dada à respectiva vazão quando o conjunto é ordenado de forma decrescente.

Inicia-se o processo de cálculo da vazão para um dado tempo de retorno (T_r), Q_{Tr} , para as diferentes distribuições, pela equação de Ven-Te-Chow, aplicada a cada uma delas.

$$Q_{Tr} = \bar{Q} + K_X \sigma \quad (8)$$

Na qual $\bar{Q}$ e σ são a média e o desvio padrão das vazões, e K_X é o fator de frequência da distribuição que varia para cada uma das distribuições.

No caso das distribuições que são calculadas a partir do logaritmo, utiliza-se a média e o desvio padrão deles para calcular o W_{Tr} , cujo resultado é utilizado como o expoente na fórmula da vazão.

$$W_{Tr} = \bar{W} + K_{L-X} \sigma_w \quad (9)$$

$$Q_{Tr} = 10^{W_{Tr}} \quad (10)$$

Os valores dos fatores de frequências das distribuições foram calculados das seguintes formas:

- Distribuição Log-Normal (K_{L-N})

O K_{L-N} pode ser calculado no Excel utilizando a fórmula “INV.NORMP”, sendo o valor solicitado a frequência de não excedência.

- Distribuição Pearson Tipo III (K_P)

O valor de K_P depende de YTR, que varia de acordo com a probabilidade e o coeficiente de assimetria da amostra (G). Esse coeficiente foi calculado pela função “DISTORÇÃO” e os dados de entrada são todos os valores de vazão da amostra. O YTR pode ser encontrado, pelo Excel, com a função “INV.GAMA”, na qual é utilizada a probabilidade de não excedência quando $G > 0$ e de excedência caso contrário. O segundo parâmetro solicitado é o alfa, que é dado por

$$\alpha = \frac{4}{G^2} \quad (11)$$

Tendo o valor de YTR, pode-se encontrar o K_P

$$K_P = \frac{G}{2} (YTR - \alpha) \quad (12)$$

- Distribuição Log-Pearson Tipo III (K_{L-P})

Segue-se o mesmo princípio da distribuição Pearson Tipo III, utilizando, nesse caso, os valores dos logaritmos das vazões para os cálculos de G_w e α_w . O YTR_w também é encontrado pela função “INV.GAMA”. Assim,

$$\alpha_w = \frac{4}{G_w^2} \quad (13)$$

$$K_{L-P} = \frac{G_w}{2} (YTR_w - \alpha_w) \quad (14)$$

- Distribuição Gumbel Teórica (K_{GT})

Calculou-se, inicialmente, o valor de y pela fórmula

$$y = -\ln(-\ln(P\{Q \leq Q_0\})) \quad (15)$$

e, com o resultado encontrou-se o K_{GT}

$$K_{GT} = 0,7797 y - 0,45 \quad (16)$$

- Distribuição Gumbel Finita (K_{GF})

A distribuição Gumbel Finita também faz uso do valor de y calculado na distribuição Gumbel Teórica. Dessa forma, o K_{GF} é dado por

$$K_{GF} = \frac{y - Y_N}{\sigma_N} \quad (17)$$

Os valores de Y_N e de σ_N são tabelados e variam de acordo com o tamanho da amostra.

É possível verificar qual das distribuições teóricas melhor representa a amostra por meio de testes de aderência. Esses testes têm como objetivo avaliar a adequação entre a frequência calculada pela distribuição proposta e a frequência real de ocorrência (NAGHETTINI & PINTO, 2007).

O teste de Kolmogorov-Smirnov é considerado como sendo não paramétrico, ou seja, os dados comparados podem pertencer a conjuntos que não estão ajustados em uma função de distribuição conhecida (PRESS et al., 2011 apud GANDINI, 2016). Ele se baseia na maior diferença existente entre as probabilidades empírica (F_N) e teórica (F_X) das variáveis (NAGHETTINI & PINTO, 2007), matematicamente tem-se:

$$D_{\max} = \max_{-\infty < x < \infty} |F_N(x) - F_X(x)| \quad (18)$$

Para alguns tamanhos de amostras, existem valores críticos de D , D_{crit} , tabelados para certos níveis de significância, como pode ser observado na Tabela 1. O valor de h é determinado pela Equação 19.

Tabela 1 – Valores de D_{crit} no teste KS (NAGHETTINI & PINTO, 2007).

Tamanho da amostra (N)	Nível de significância			
	0,01	0,02	0,05	0,10
10	0,489	0,457	0,409	0,369
15	0,404	0,377	0,338	0,304
20	0,352	0,329	0,294	0,265
25	0,317	0,295	0,264	0,238
30	0,290	0,270	0,242	0,218
35	0,269	0,251	0,224	0,202
40	0,252	0,235	0,210	0,189
>40	$1,63/\sqrt{h}$	$1,52/\sqrt{h}$	$1,36/\sqrt{h}$	$1,22/\sqrt{h}$

$$h = \sqrt{N} + 0,12 + \frac{0,11}{\sqrt{N}} \quad (19)$$

Com os valores das vazões ordenados de forma decrescente, assim como os logaritmos das vazões e as frequências observadas de excedência e de não excedência calculadas, deve-se, então, calcular as frequências teóricas de excedência para cada uma das distribuições de probabilidade. Esse procedimento também pode ser realizado no Excel.

Para a distribuição Log-Normal, esse valor equivale a 1 menos o resultado da função “DIST.NORM”, sendo que os parâmetros de entrada são o logaritmo da vazão, a média e o desvio padrão da série dos logaritmos. O procedimento para a Pearson Tipo III e a Log-Pearson Tipo III é semelhante, mas utiliza-se a função “DIST.GAMA” subtraída de 1. Os parâmetros de entrada para a Pearson Tipo III são a diferença entre a vazão e o coeficiente γ , calculado pela Equação 20, α e β (Equação 21); para a Log-Pearson Tipo III são a diferença entre o logaritmo da vazão e o coeficiente γ_w , α_w e β_w :

$$\gamma = \bar{Q} - \sqrt{\sigma^2 \alpha} \quad (20)$$

$$\beta = \sqrt{\sigma^2 / \alpha} \quad (21)$$

em que $\bar{Q}$ é a média das vazões, σ é o desvio padrão da amostra e α é dado pela Equação 11; γ_w , α_w e β_w são calculados de forma análoga a partir dos logaritmos.

Já para as distribuições tipo Gumbel, calcula-se essa frequência como sendo

$$P\{Q \geq Q_0\} = 1 - \exp(-\exp(-y)) \quad (22)$$

em que y é dado por

$$y = \frac{Q - \bar{Q} + 0,45\sigma}{0,7797\sigma}, \text{ para a distribuição Gumbel Teórica e} \quad (23)$$

$$y = \sigma_N \left(\frac{Q - \bar{Q}}{\sigma} + \frac{Y_N}{\sigma_N} \right), \text{ para a distribuição Gumbel Finita.} \quad (24)$$

O $D_{\text{máx}}$ de cada uma das distribuições é, então, o maior valor absoluto dentre as diferenças entre a frequência de excedência observada e a frequência de excedência calculada referente a cada distribuição.

Gandini (2016) traz uma importante perspectiva acerca dos resultados do teste KS, visto que, ao se analisar diversas distribuições, mais de uma pode ser aceita. Nesse caso, é preciso estabelecer uma ordem entre elas que mostre qual é a mais adequada, ou seja, a que melhor representa a amostra analisada, dessa forma pode-se calcular o p-valor e escolher a distribuição com o maior valor.

Inicialmente, deve-se determinar o número de pontos efetivos (N_e), sendo:

- $N_e = N$, com N igual ao número de pontos experimentais, para distribuições contínuas, e
- $N_e = \frac{N_1 \times N_2}{N_1 + N_2}$, com N_1 e N_2 referentes aos dados da primeira e da segunda distribuição, respectivamente, nos casos de comparação entre duas sequências de dados experimentais.

Neste trabalho só foi abordada a primeira situação. Então, o N_e teve seu valor igualado ao tamanho da amostra.

O p-valor, Q_{KS} , pode ser calculado pela seguinte equação:

$$Q_{KS}(z) = 1 - P_{KS}(z) = 1 - \left[\frac{\sqrt{2\pi}}{z} \sum_{j=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{(2j-1)^2\pi^2}{8z^2}\right) \right] \quad (25)$$

sendo z calculado conforme equação a seguir:

$$z = \left(\sqrt{N_e} + 0,12 + \frac{0,11}{\sqrt{N_e}} \right) D_{\text{máx}} \quad (26)$$

As interpretações do teste são, se:

$$D_{\text{máx}} \leq D_{\text{crítico}}, \text{ a distribuição não é rejeitada, assim como se } Q_{KS} \geq \alpha \text{ e} \quad (27)$$

$$D_{\text{máx}} > D_{\text{crítico}}, \text{ a distribuição é rejeitada, assim como se } Q_{KS} < \alpha. \quad (28)$$

Neste trabalho, considerou-se uma significância (α) de 0,10.

Com a definição da melhor distribuição, calcula-se, baseado nela, as vazões para os tempos de retorno desejados. A probabilidade de uma vazão ser excedida para um determinado Tr é dada pela Equação 29.

$$P\{Q \geq Q_0\} = \frac{1}{Tr} \quad (29)$$

A probabilidade de não excedência é calculada pela Equação 7.

O procedimento descrito no tópico 3.2.2 para tal distribuição é aplicado para os valores de probabilidade calculados a partir do tempo de retorno.

3.3 Delimitação do trecho de rio

Utilizando o HEC-RAS 6.4.1, que é um *software* livre, é possível realizar a delimitação da bacia tanto de forma integral quanto em regiões menores, as sub-bacias, para a realização de uma análise mais detalhada das características dela. Para a modelagem hidráulica, pode-se optar também por delimitar apenas um trecho

de um curso d'água, em vez de toda a bacia, neste trabalho optou-se por essa abordagem.

Os dados de base para efetuar essa delimitação foram retirados da Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-Sisema) e o *raster*, de código 20s45_ZN, do TOPODATA - Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (<http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>¹); os procedimentos foram feitos utilizando o *software* QGIS 3.32, também gratuito, e o trecho do rio escolhido foi aquele que está compreendido na parte urbana do município de Itabirito.

3.4 Criação da geometria do rio

Para realizar o processo da simulação da mancha de inundação de um rio, é preciso, primeiramente, definir a disposição desse rio no espaço geográfico. Dessa forma, há a necessidade de criar sua geometria. Optou-se, neste trabalho, pela realização desse processo no *software* HEC-RAS, na área denominada *RAS Mapper*.

Inicia-se definindo uma projeção na qual o projeto será feito, neste caso foi a zona UTM 23S de acordo com o *datum* SIRGAS 2000. Em seguida, é carregado o modelo numérico com a criação de um terreno, que é o resultado de recortes feitos no *software* QGIS com base em arquivos retirados do TOPODATA e do IDE Sisema para delimitar a região do rio e sua topografia. Com o modelo carregado, começa-se o processo de criação da geometria e da marcação dos *layers* utilizados, que foram o *Rivers* e o *Cross Sections*.

¹ Na data de elaboração da versão corrigida deste trabalho, este endereço estava fora do ar, pois o INPE está movendo seus dados para o portal .gov. No entanto, é possível acessar as informações em outro endereço, desenvolvido por Eduardo Patto Kanegae: <https://www.google.com/maps/d/u/0/viewer?mid=1Yle0c2VU4waXo-Kzn0RBONZG9NgSYas&ll=-16.08237388270248%2C-48.02229032282711&z=4>

Primeiramente, faz-se a marcação do eixo do rio com o primeiro *layer* citado. Dentro desse mesmo *layer*, existem subgrupos, sendo que foi utilizado o *Bank Lines* para demarcar as margens do rio Itabirito, começando pela esquerda e, em seguida, pela direita. Nesses três casos (eixo, margem esquerda e margem direita) é preciso ter maior cuidado nas regiões de curvas, tentando expressar da melhor forma possível o contorno do rio.

Outro subgrupo dentro do *Rivers* é o *Flow Paths*, que é a delimitação da área que a mancha de inundação pode chegar. Foi feita uma marcação pela esquerda e depois pela direita, respeitando a topografia da região, ou seja, foram feitas em regiões mais altas que o rio.

Por fim, marcam-se as seções do rio, utilizando o *layer Cross Sections*. Ao longo de aproximadamente 16 km de rio, foram feitas 119 seções seguindo o percurso do rio, ou seja, de montante para jusante. Elas são enumeradas à medida que são criadas, e o valor associado a elas é a distância até o ponto final do trecho modelado do rio. O ideal é que as seções tenham o mesmo tamanho e não sejam muito espaçadas, de forma que a representação seja a mais fiel possível à realidade. Em regiões de curva, devem ser feitas mais seções, de forma a abranger melhor o percurso. O mesmo se aplica quando há pontes e passarelas, onde é preciso marcar uma seção imediatamente antes e outra imediatamente após a construção.

3.5 Simulação hidráulica

Após finalizar a utilização do *RAS Mapper* realiza-se a importação dos dados para a área denominada *View/Edit geometric data*, na qual são verificadas as seções criadas e a elas atribuídas suas características. Uma delas é o número de Manning, o qual adotou-se o valor de 0,045 seguindo a Tabela 2, que se refere à condição regular de rio “com meandros, bancos e pequenos poços pouco profundos, limpos”, como identificado em negrito na Tabela 2.

Além de dados de vazão, a estação 41180000 também fornecia a seção transversal do rio. Por ser o único dado disponível acerca dessa característica, adotou-se que ela seria a mesma para toda a extensão do rio Itabirito. Assim, ela foi

atribuída em cada uma das seções estabelecidas no *layer Cross Sections*, de forma que a calha do rio pudesse ser retratada na simulação.

Tabela 2 – Valores do coeficiente de rugosidade da fórmula de Manning para arroios e rios (PORTO, 2008).

Arroios e rios	Condições			
	Muito boas	Boas	Regulares	Más
1. Limpos, retilíneos e uniformes	0,025	0,028	0,030	0,033
2. Como em 1, porém com vegetação e pedras	0,030	0,033	0,035	0,040
3. Com meandros, bancos e poços pouco profundos, limpos	0,035	0,040	0,045	0,050
4. Como em 3, águas baixas, declividade fraca	0,040	0,045	0,050	0,055
5. Como em 3, com vegetação e pedras	0,033	0,035	0,040	0,045
6. Como em 4, com pedras	0,045	0,050	0,055	0,060
7. Com margens espreiadas, pouca vegetação	0,050	0,060	0,070	0,080
8. Com margens espreiadas, muita vegetação	0,075	0,100	0,125	0,150

O regime de escoamento definido para a simulação foi o permanente. Essa escolha se deu tanto pelos dados disponíveis para a realização do trabalho quanto pelo fato de que, nessas condições, há uma majoração dos resultados, ou seja, eles estão a favor da segurança ao se pensar em um possível dimensionamento associado aos valores encontrados. Também foram definidas as condições de contorno para as vazões a serem simuladas, adotou-se, tanto para a seção de montante quanto para a de jusante, a profundidade normal, que varia com o coeficiente de rugosidade de Manning, a vazão, a largura do fundo, a declividade do rio e a dos taludes. A seção transversal da calha é utilizada para a obtenção dos parâmetros geométricos, e a declividade longitudinal foi determinada como sendo a razão entre a diferença de cotas dos pontos de montante e jusante do trecho e a distância entre eles.

4 RESULTADOS

4.1 Confiabilidade dos dados

Dentre as vazões observadas, as duas maiores, 350,651 m³/s e 259,33 m³/s, referentes aos anos de 1997 e 2012, respectivamente, obtiveram a condição de *outlier* em apenas um dos métodos. Neste trabalho adotou-se que os dados seriam passíveis de exclusão se obtivessem tal condição em ambos os métodos utilizados. Por esse motivo e devido ao fato de que nesses anos houve eventos chuvosos de grande intensidade que levaram o rio a apresentar tais vazões, esses valores não foram excluídos.

Segundo Almeida (1997), a cidade de Itabirito foi uma das mais atingidas pelas chuvas de verão de 1997. Além disso, o jornal Gazeta de Itabirito publicou fotos das consequências geradas pela enchente, como pode ser visto na Figura 6. Em 2012 houve várias notícias acerca dos acontecimentos envolvendo a chuva no município, como relatado em Rodrigues (2012) e em G1 (2012). Ambas as reportagens relatam as dificuldades dos moradores após a chuva, como o fato de o nível do rio ter subido tanto a ponto de as casas terem marcações de aproximadamente 30 cm de lama.



Figura 6 – Reportagem do jornal Gazeta de Itabirito sobre enchente de 1997 (SOU NOTÍCIA, 2022b).

4.2 Análise das distribuições

Os valores para as vazões teóricas das distribuições Log-Normal, Pearson Tipo III, Log-Pearson Tipo III, Gumbel Teórica e Gumbel Finita são mostrados no Apêndice A. Para todas elas realizou-se o teste de aderência de KS para que se identificasse aquela que tivesse o melhor ajuste aos dados. O Apêndice B apresenta os valores das frequências encontrados para cada uma das distribuições e as Figuras 7 a 11 mostram o ajuste das vazões em cada uma das distribuições adotadas para as frequências calculadas.

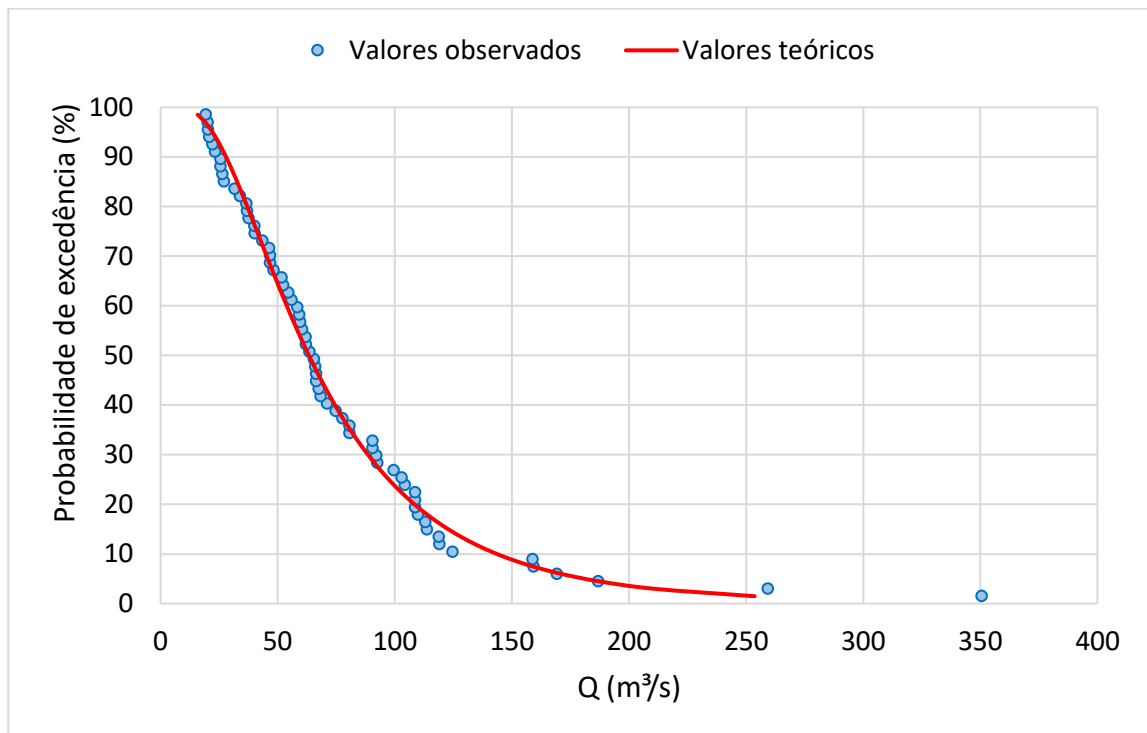


Figura 7 – Ajuste vazões para distribuição Log-Normal (AUTORA, 2024).

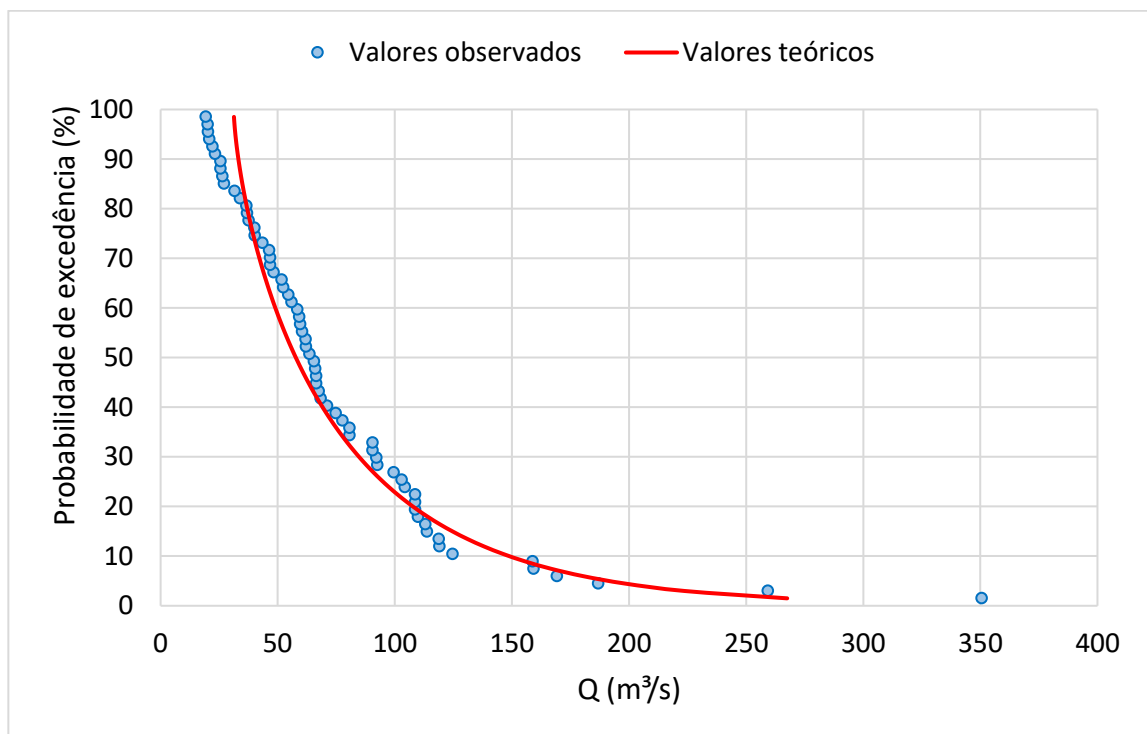


Figura 8 – Ajuste vazões para distribuição Pearson Tipo III (AUTORA, 2024).

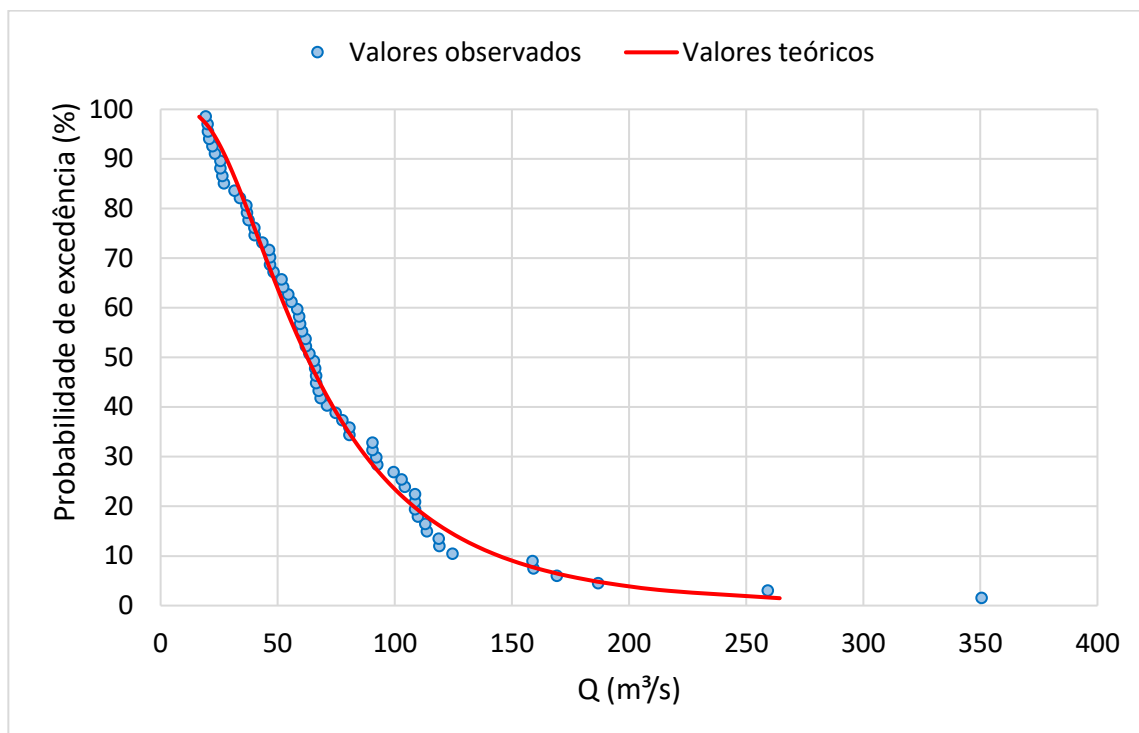


Figura 9 – Ajuste vazões para distribuição Log-Pearson Tipo III (AUTORA, 2024).

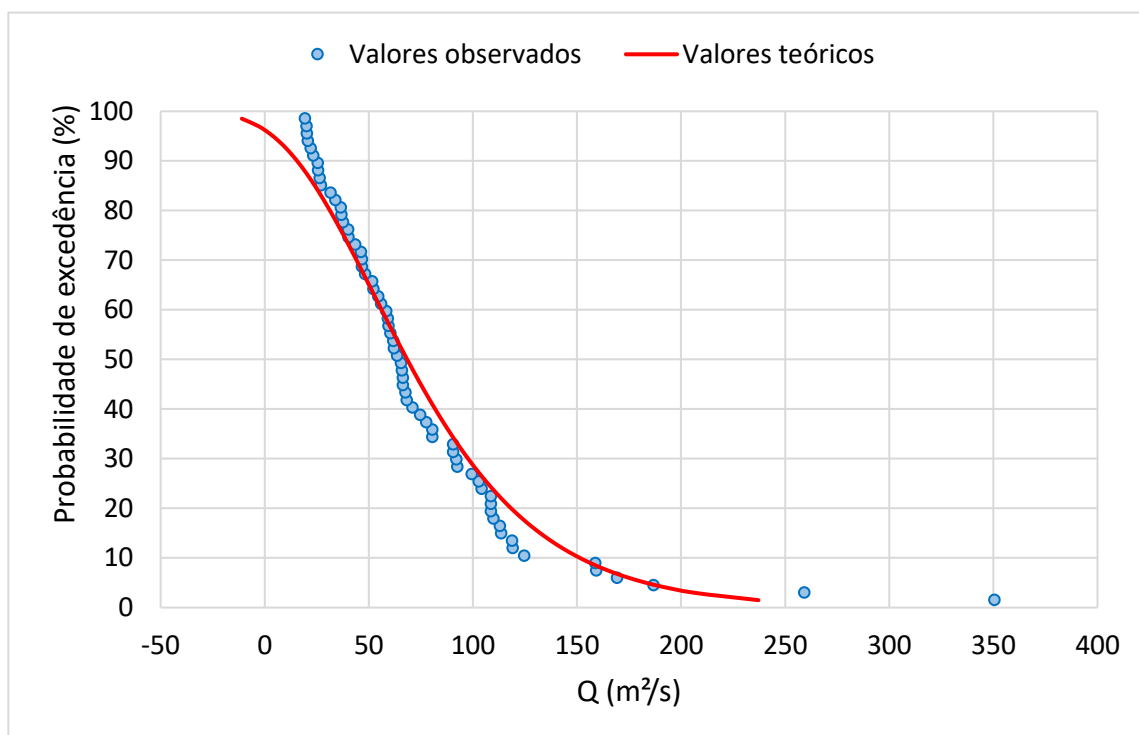


Figura 10 – Ajuste vazões para distribuição Gumbel Teórica (AUTORA, 2024).

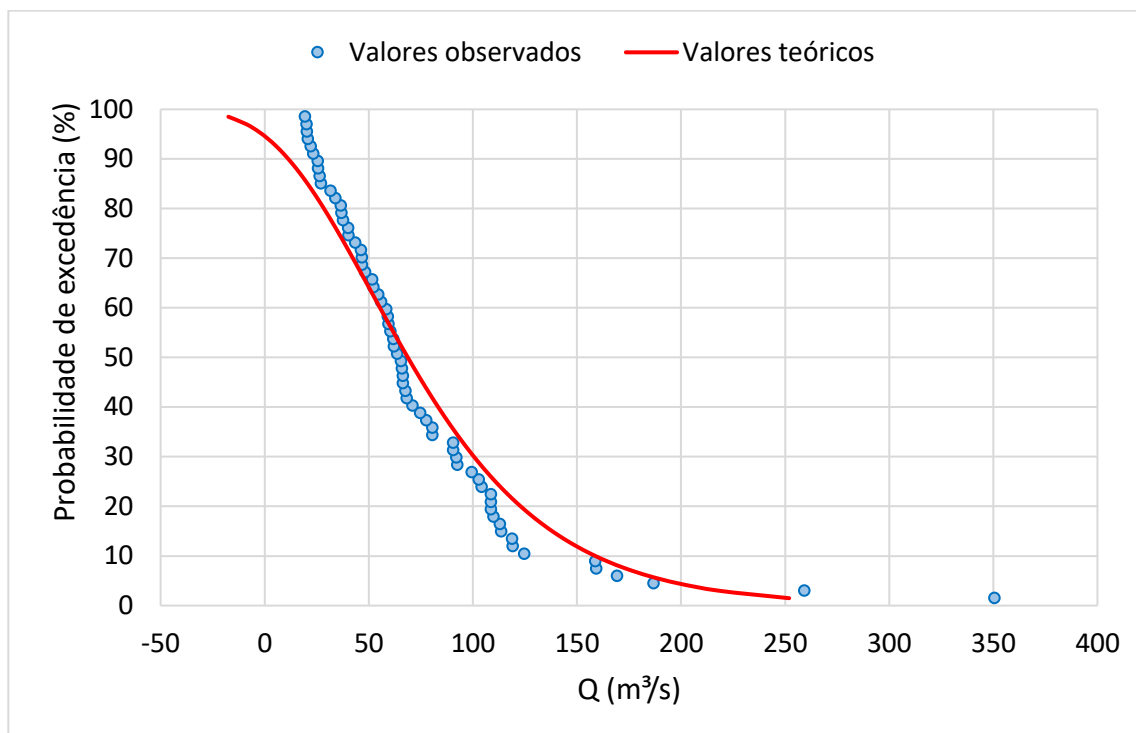


Figura 11 – Ajuste vazões para distribuição Gumbel Finita (AUTORA, 2024).

Baseando-se apenas nos resultados gráficos anteriores, percebe-se uma dificuldade na distinção de qual delas deve ser utilizada. Dessa forma é preciso analisar os resultados do teste KS. Na distribuição Pearson Tipo III, ocorre, a partir de uma determinada vazão, um aviso de erro, pois a vazão considerada é menor que o resultado obtido pela Equação 20. Como a distribuição escolhida não foi ela, essa questão não impactou os resultados obtidos.

Para todas as distribuições calculou-se o p-valor, que está apresentado na Tabela 3 em ordem decrescente. Pela Equação 27 observa-se que nenhuma das distribuições foi rejeitada. As que melhor se ajustaram foram a Log-Pearson Tipo III e a Log-Normal, sendo a última aquela de representação mais fiel, visto que foi a que teve o maior p-valor, encontrado pela Equação 25.

Ressalta-se, porém, que em todas as distribuições, os dois valores extremos máximos, considerados *outliers* pelo método de Grubbs, não foram ajustados de

forma adequada. É possível fazer essa verificação pelos resultados gráficos apresentados, Figuras 9 a 13, e pelos dados numéricos explicitados no Apêndice A.

Tabela 3 – p-valores encontrados para as diferentes distribuições (AUTORA, 2024).

Distribuição	p-valor
Log-Normal	0,9586
Log-Pearson Tipo III	0,9075
Gumbel Teórica	0,3691
Pearson Tipo III	0,3084
Gumbel Finita	0,1807

Levando em consideração os tempos de retorno de 2, 10, 25, 50 e 100 anos, obtêm-se, utilizando a distribuição Log-Normal, os valores de vazão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores da vazão para diferentes tempos de retorno (AUTORA, 2024).

Tr (anos)	P {Q ≥ Q₀}	P {Q ≤ Q₀}	K_{L-N}	W_{Tr}	Q_{Tr} (m³/s)
2	0,50	0,50	0	1,802	63,34
10	0,10	0,90	1,282	2,157	143,60
25	0,04	0,96	1,751	2,287	193,77
50	0,02	0,98	2,054	2,371	235,15
100	0,01	0,99	2,326	2,447	279,88

Após realizar a caracterização supervisionada de uma sub-bacia do rio Itabirito, Rodrigues (2019) encontrou que nessa região há a presença de Cambissolo e Neossolo, que segundo Santos et al. (2018) são descritos como:

- Cambissolo: constituído por material mineral, sendo seu horizonte B considerado incipiente, suas características sofrem grandes mudanças a depender do local em que se encontram por causa do relevo, condições

climáticas e heterogeneidade dos materiais, e podem ter alta ou baixa capacidade drenante.

- Neossolo: podem ser constituídos tanto por material mineral quanto por material orgânico pouco espesso, por volta de 20 cm, não apresentam horizonte B e podem ser divididos em quatro classes – Flúvicos, Litólicos, Quartzarênicos e Regolíticos.

Esses solos, de acordo com Sartori, Neto, & Genovez (2005), são enquadrados nos grupos hidrológicos C e D do Método do SCS (*Soil Conservation Service* - atualmente NRCS (*Natural Resources Conservation Service*)), esses grupos englobam solos com alto potencial de geração de escoamento superficial, principalmente o D, o que significa que a pedologia da região contribui para uma vazão mais alta no rio Itabirito, já que elevado escoamento remete a uma baixa infiltração e, consequentemente, a um maior volume de água alcançando o rio.

A região em que se encontra o trecho do rio Itabirito analisado é majoritariamente urbana, isso impacta diretamente, como já descrito neste trabalho, a quantidade e a velocidade da água que chega ao canal. Áreas urbanizadas remetem à impermeabilização do solo, tanto pelo uso de asfaltos como também pelas construções existentes – casas, calçadas, pontes e passarelas. O aumento da impermeabilização da superfície faz com que haja menos infiltração de água e gera um escoamento superficial elevado. Assim como no caso do tipo de solo, esse fator também colabora para que a vazão do rio aumente.

O outro fator descrito como influente nas condições de uma região é o clima local. No município de Itabirito, pela sua classificação, é identificada a presença de chuvas na estação do verão. Tanto nos anos de 1997, 2012 e 2022 as inundações ocorreram nos meses de dezembro ou janeiro, considerados os mais chuvosos para a região em que se localiza o município, o que corrobora a opção de não excluir as vazões referentes aos dois primeiros anos citados, pois a alta a precipitação está diretamente relacionada à alta vazão do rio nesses períodos. Essa associação demonstra que o clima interfere em questões relacionadas ao comportamento ambiental de uma localidade.

Os valores teóricos e os observados de vazão foram bem próximos, como pode ser observado na Tabela 5, evidenciando um bom ajuste da curva dada pela Log-Normal, com exceção dos valores para o Tr de 50 anos; quanto ao Tr de 100 anos, não é possível fazer essa comparação, pois a série possui 66 anos de dados. Optou-se pela utilização das vazões calculadas de forma a se obter a mancha de inundação teórica do trecho analisado do rio Itabirito e também por padronizar o tipo dos dados utilizados.

Tabela 5 – Valores da vazão calculados e observados para diferentes tempos de retorno (AUTORA, 2024).

Tr (anos)	Q _{Tr} (m³/s) Dist. Log-Normal	Q _{Tr} (m³/s) observado	Erro relativo (%)
2	63,34	64,56	-1,89
10	143,60	133,99	7,17
25	193,77	204,35	-5,18
50	235,15	304,23	-22,71
100	279,88	-	-

4.3 Delimitação do trecho de rio

A localização da bacia do rio Itabirito é na porção sul da bacia do rio das Velhas, como mostra a Figura 12. Nessa figura, também se encontra representado o curso d'água principal da bacia do rio Itabirito. Na Figura 13 apresenta-se o trecho escolhido do curso d'água principal para esse estudo bem como a localização da estação fluviométrica utilizada para obtenção dos dados de vazão e da seção transversal do rio. As coordenadas geográficas da estação são: 20°18'04" Latitude Sul e 43°47'53" Longitude Oeste (MYR, 2013b) sendo que ela se localiza a montante da região que foi delimitada para análise, como pode ser observado pelas marcações na Figura 13. A distância entre ela e o ponto inicial do trecho estudado, medindo em linha reta, é de aproximadamente 355 metros.

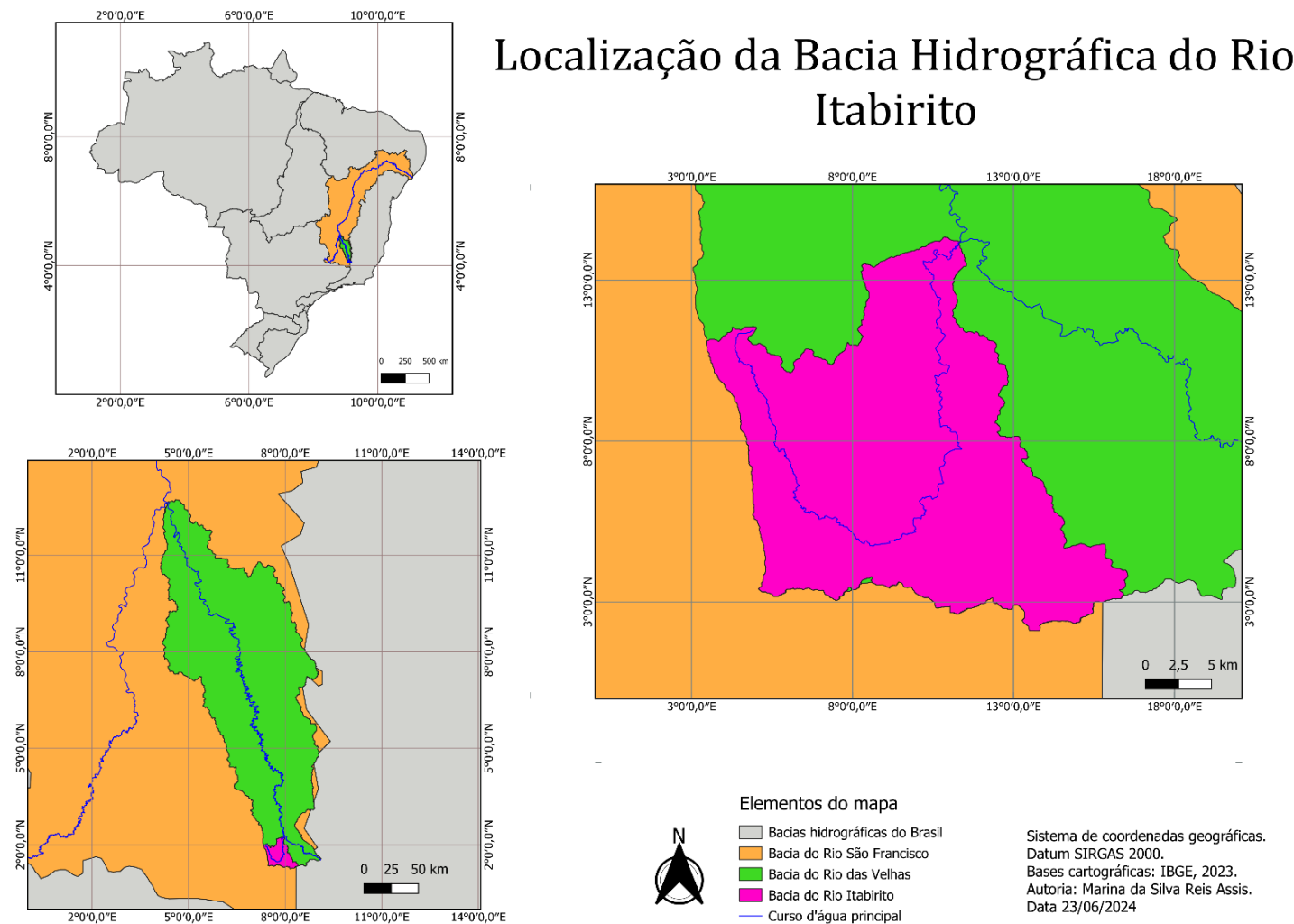


Figura 12 – Localização da bacia do rio Itabirito na bacia do rio das Velhas (AUTORA, 2024).

Localização do trecho do rio modelado e da estação fluviométrica

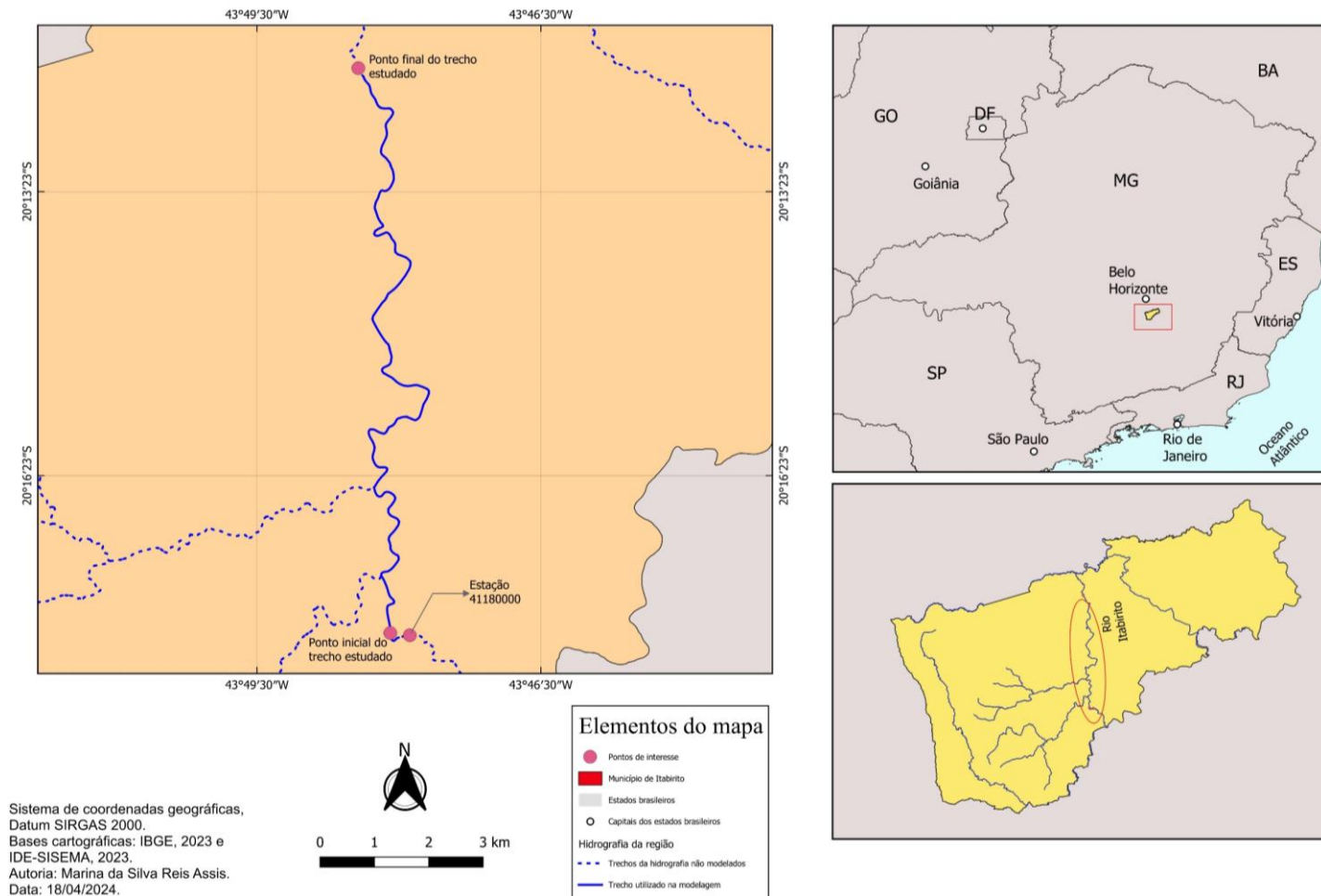


Figura 13 – Localização da estação 41180000 e do trecho do rio utilizado na modelagem (AUTORA, 2024).

4.4 Geometria do rio Itabirito

Utilizando as ferramentas disponíveis no *RAS Mapper* criou-se a geometria do rio, como pode ser observado na Figura 14, sendo a seção 15944 de montante e a 5 de jusante. Nela é possível observar o eixo do rio (azul escuro), as seções transversais definidas (verde) e o *Flow Paths* (azul claro).



Figura 14 – Geometria do rio (AUTORA, 2024).

A configuração do perfil das seções transversais foi baseada nos dados referentes à estação 41180000. Foram feitos ajustes de forma que ela se encaixasse em todas as seções definidas no programa. Esses ajustes incluíram posicionar o eixo da seção de forma coincidente ao eixo do rio e eliminar pequenas variações bruscas de cota

que aconteceram, algumas vezes, entre a cota das margens e a cota do terreno. O resultado da seção 3383 pode ser visto na Figura 15, que foi retirada do HEC-RAS.

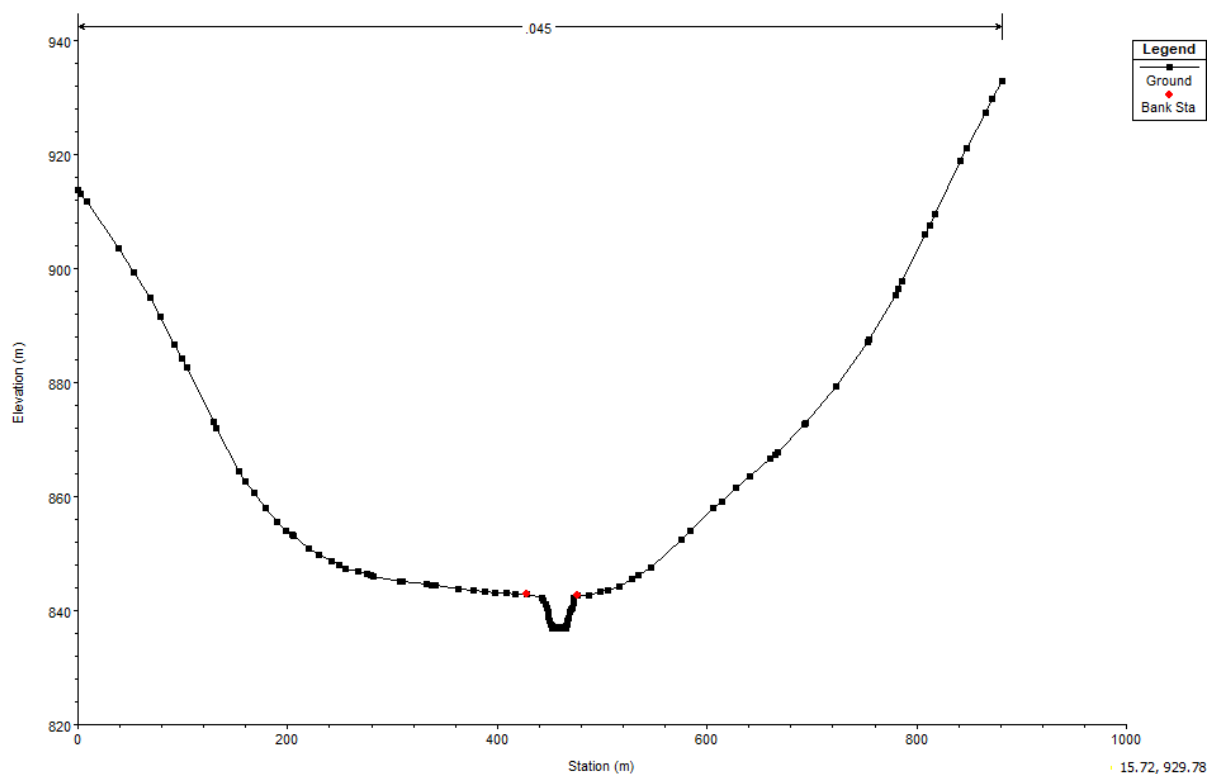


Figura 15 – Perfil da seção transversal, incluindo a calha do rio, disponibilizado pelo HEC-RAS (AUTORA, 2024).

Devido ao fato de os eixos vertical e horizontal não apresentarem a mesma escala, cria-se a impressão de que existe um desnível acentuado ao longo da seção. No entanto, como pode ser visto na Figura 16, que representa a mesma seção, mas com a mesma escala em ambos os eixos e com enfoque no fundo do rio, isso não é verificado.

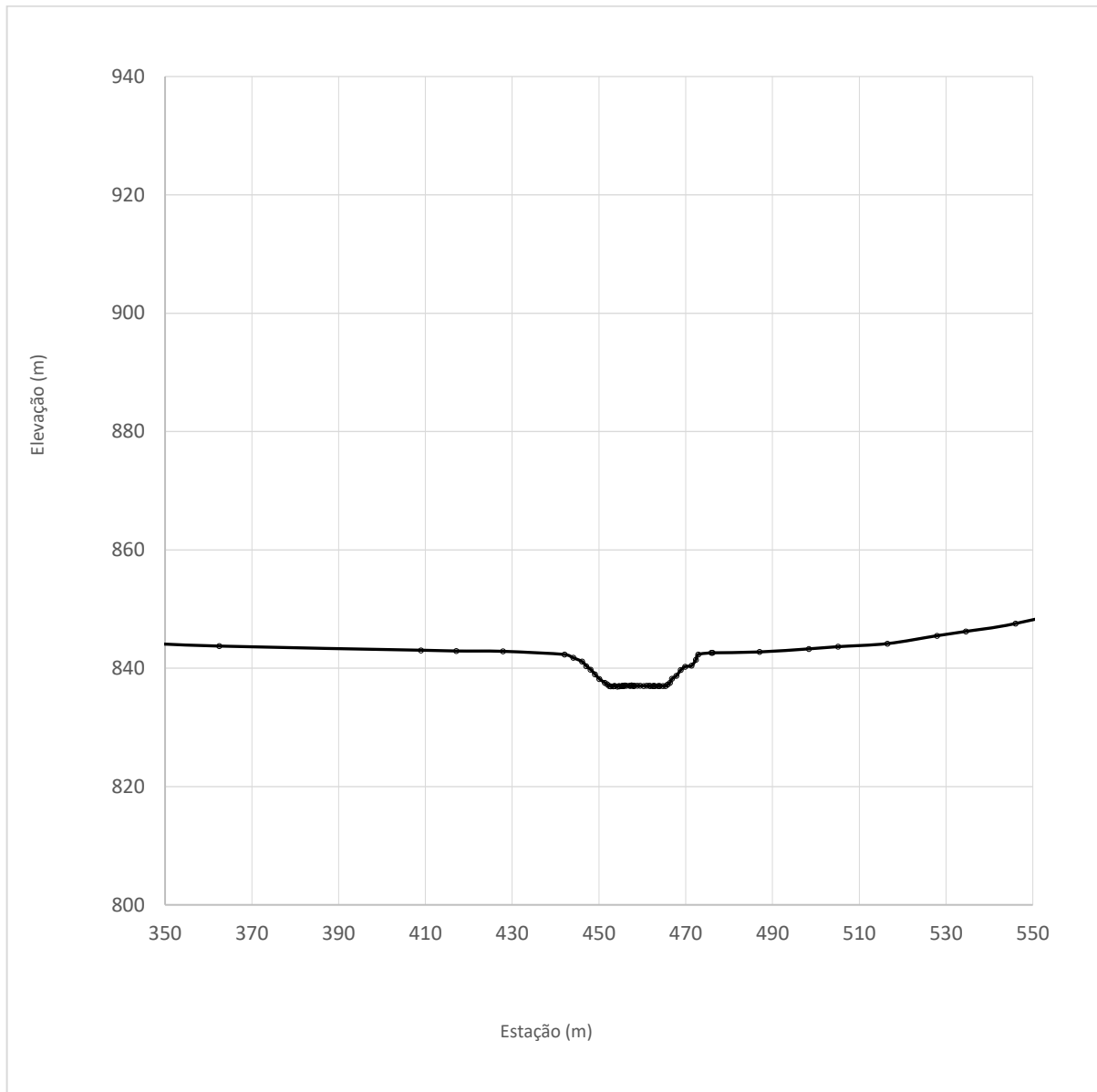


Figura 16 – Seção transversal, incluindo a calha do rio, em escala igual para X e Y (AUTORA, 2024).

4.5 Simulação hidráulica

Os valores de vazão calculados anteriormente, em m^3/s , para os tempos de retorno definidos foram aplicados no HEC-RAS como parâmetros de entrada para a simulação, considerando o regime de escoamento permanente e uniforme, como

mostrado na Figura 17. Assim, haverá 5 resultados para cada uma das seções indicadas.

Steady Flow Data - escoamento

File Options Help

Description :

Enter/Edit Number of Profiles (32000 max): Reach Boundary Conditions ...

Locations of Flow Data Changes

River: Add Multiple...

Reach: River Sta.: Add A Flow Change Location

Flow Change Location			Profile Names and Flow Rates				
River	Reach	RS	Tr 2	Tr 10	Tr 25	Tr 50	Tr 100
1 River 1	Reach 1	15944	63.33641	143.5973	193.7674	235.1516	279.8755

Figura 17 – Identificação das vazões de cada tempo de retorno no HEC-RAS (AUTORA, 2024).

As condições de contorno aplicadas aos trechos de montante (*upstream*) e de jusante (*downstream*) foram as mesmas para cada um dos tempos de retorno, já que foi adotada a mesma seção em todos os trechos. Considerou-se, nesse caso, a profundidade normal, sendo assim, o programa requer a declividade da linha d'água, que pode ser igualada com a declividade do curso d'água. Encontrou-se a declividade média do rio dividindo-se a diferença de elevação das seções de montante e jusante pelo comprimento do trecho, os valores utilizados são os mostrados na Figura 18.

Steady Flow Boundary Conditions

☐ Set boundary for all profiles ☒ Set boundary for one profile at a time

Available External Boundary Condition Types

Selected Boundary Condition Locations and Types

River	Reach	Profile	Upstream	Downstream
River 1	Reach 1	Tr 2	Normal Depth S = 2.765382E	Normal Depth S = 2.765382E
River 1	Reach 1	Tr 10	Normal Depth S = 2.765382E	Normal Depth S = 2.765382E
River 1	Reach 1	Tr 25	Normal Depth S = 2.765382E	Normal Depth S = 2.765382E
River 1	Reach 1	Tr 50	Normal Depth S = 2.765382E	Normal Depth S = 2.765382E
River 1	Reach 1	Tr 100	Normal Depth S = 2.765382E	Normal Depth S = 2.765382E

Steady Flow Reach-Storage Area Optimization ...

Editor is in a mode that boundary conditions are entered per profile.

Figura 18 – Condições de contorno aplicadas às seções transversais (AUTORA, 2024).

Com todos os dados de entrada inseridos, realiza-se a simulação. As Figuras 19 a 23 retratam o resultado obtido para a seção 7677 nos diferentes tempos de retorno considerados. Essa seção foi traçada imediatamente antes de uma ponte e sua localização pode ser observada na Figura 14. Além disso, ela inclui a Rua Dr. Guilherme, em um trecho que foi atingido pela inundação de 2012, como mostra o vídeo de AgitoMais (2012), do qual foi retirada a Figura 24.

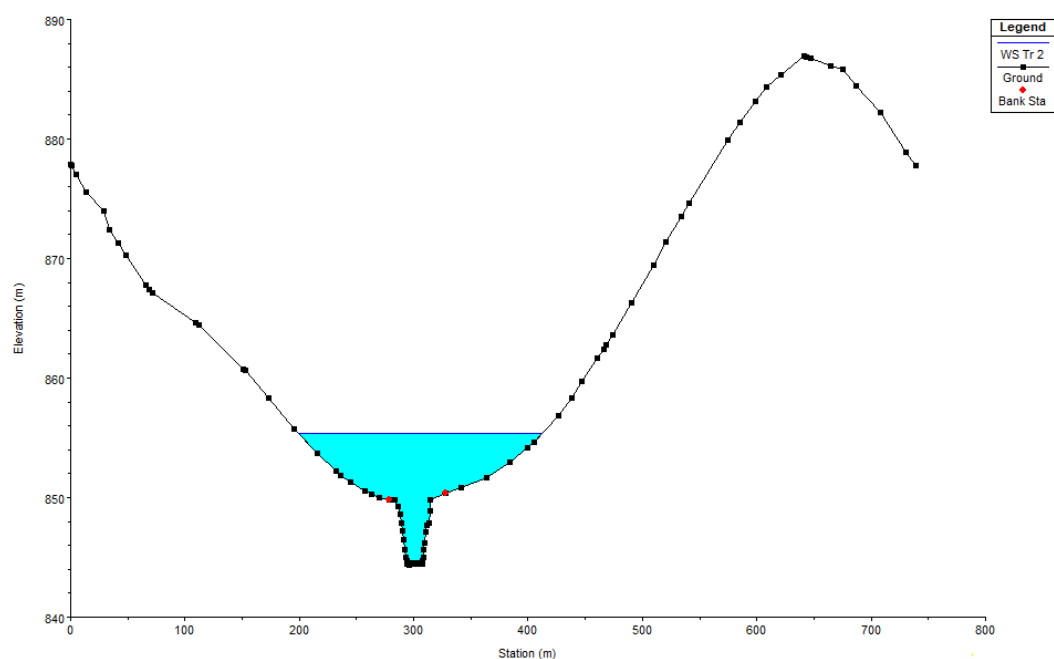


Figura 19 – Resultado da simulação na seção 7677 para o Tr de 2 anos (AUTORA, 2024).

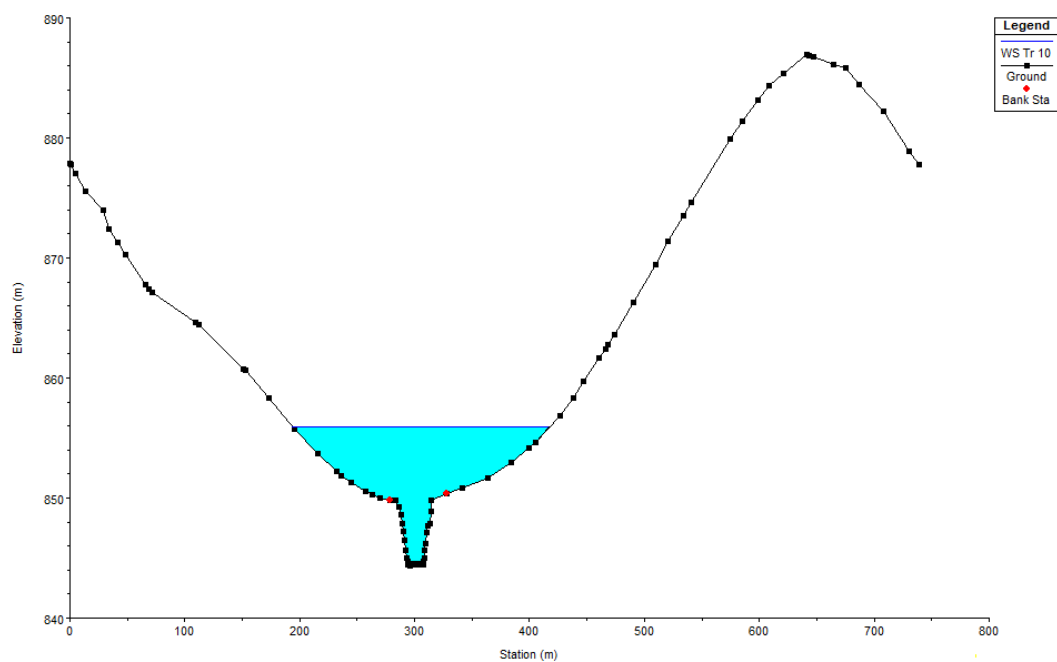


Figura 20 – Resultado da simulação na seção 7677 para o Tr de 10 anos (AUTORA, 2024).

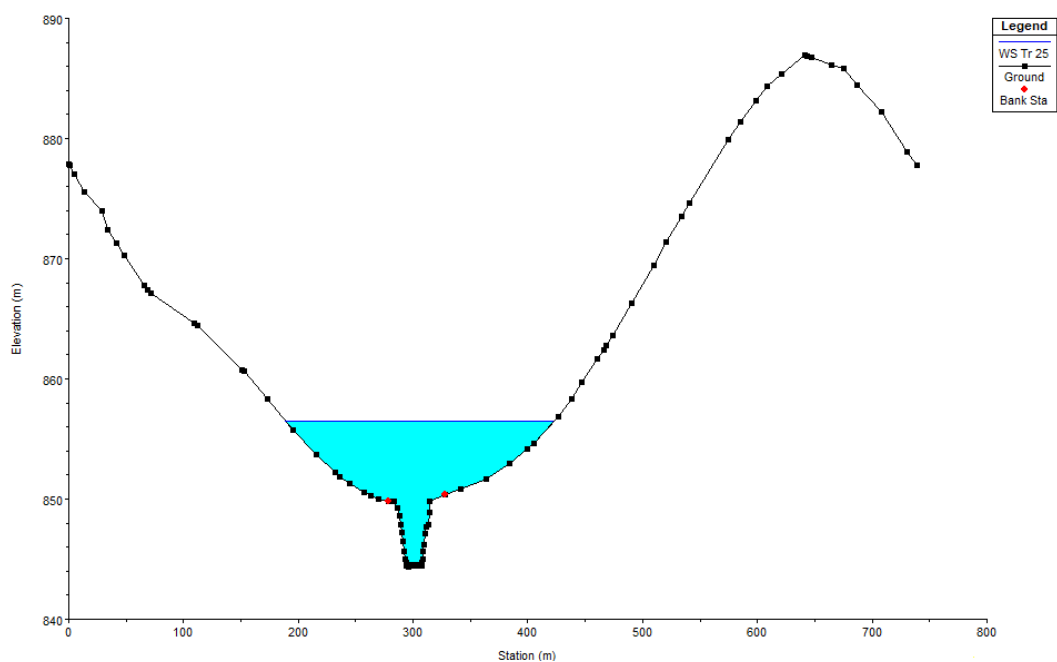


Figura 21 – Resultado da simulação na seção 7677 para o Tr de 25 anos (AUTORA, 2024).

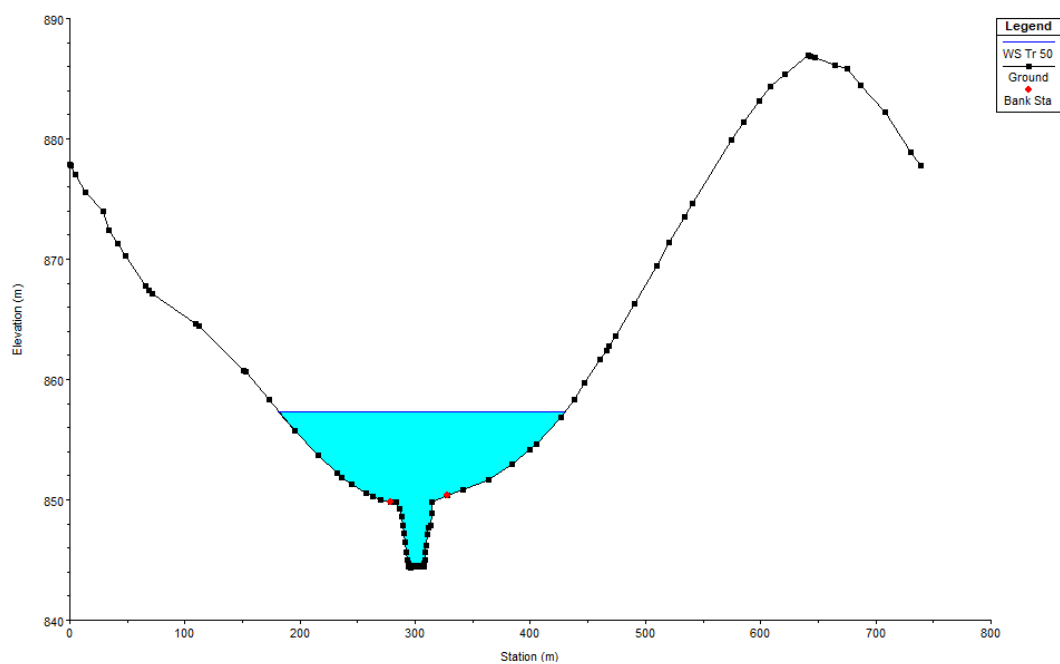


Figura 22 – Resultado da simulação na seção 7677 para o Tr de 50 anos (AUTORA, 2024).

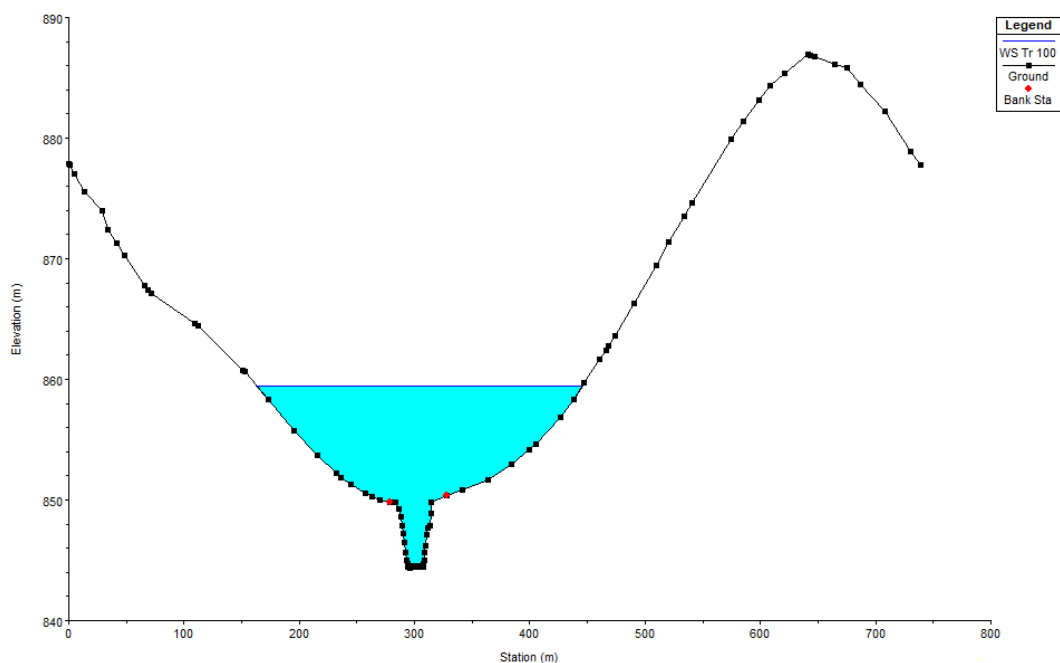


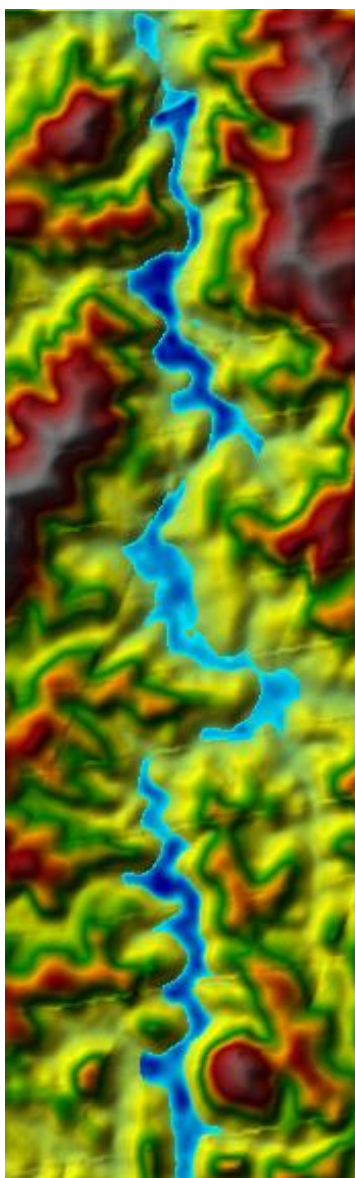
Figura 23 – Resultado da simulação na seção 7677 para o Tr de 100 anos (AUTORA, 2024).



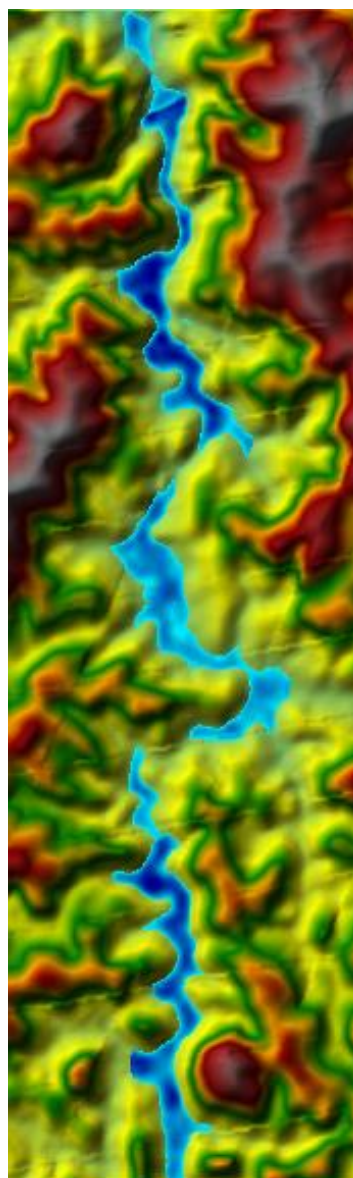
Figura 24 – Trecho da Rua Dr. Guilherme atingido pela inundação de 2012 no município de Itabirito (AGITOMAS, 2012).

Os resultados desta seção mostram uma situação que merece destaque. Espera-se que o extrapolar da calha do rio ocorra com vazões associadas a tempos de retorno altos, que estão relacionados a grandes volumes. No entanto, como mostra a Figura 19, para o Tr de 2 anos esse movimento de ultrapassar os limites do rio já é observado; isso significa que vazões bienais já causam um grande impacto na região.

Para toda a extensão do rio também é possível visualizar a extensão da mancha de inundação (Figuras 25 a 27), que, assim como o nível de água nas seções individuais, aumenta junto com o aumento do tempo de retorno.

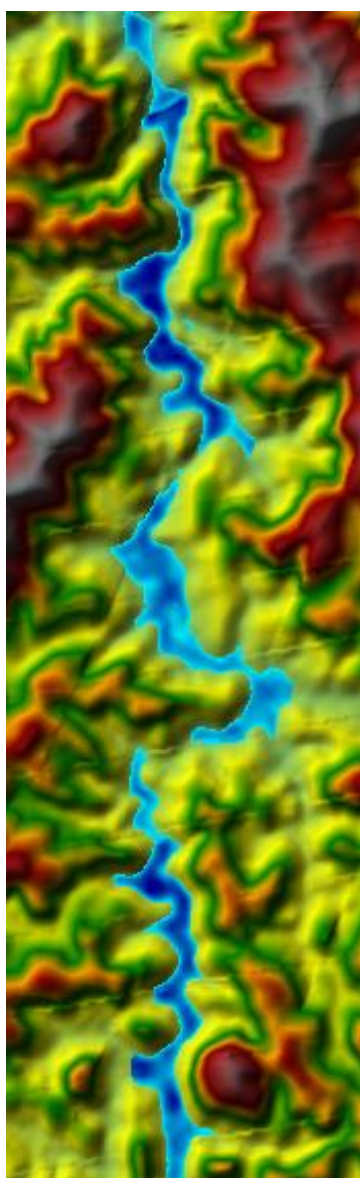


(a)

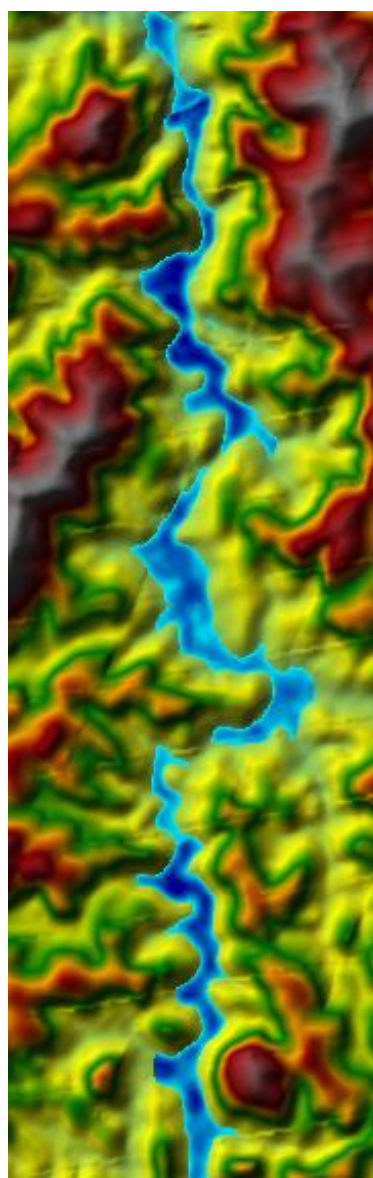


(b)

Figura 25 – Mancha de inundação do rio Itabirito para (a) o Tr de 2 anos e (b) o Tr de 10 anos (AUTORA, 2024).



(a)



(b)

Figura 26 – Mancha de inundação do rio Itabirito para (a) o Tr de 25 anos e (b) o Tr de 50 anos (AUTORA, 2024).

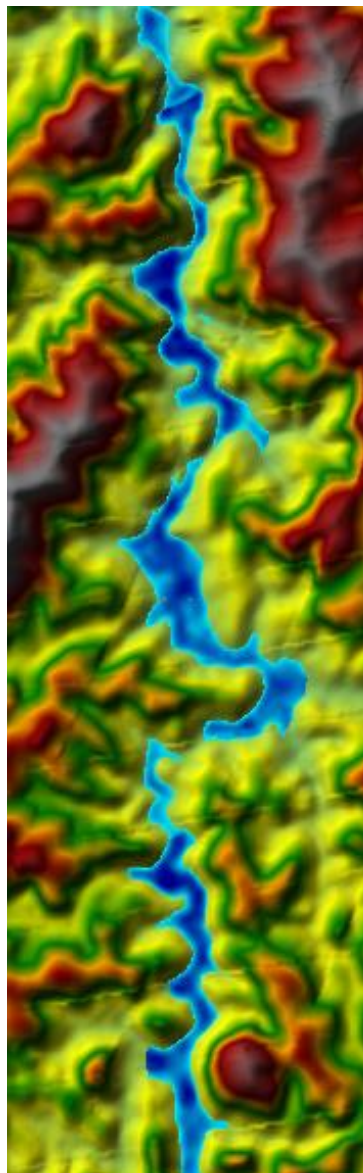


Figura 27 – Mancha de inundação do rio Itabirito para o Tr de 100 anos (AUTORA, 2024).

Pode ser observada uma descontinuidade da mancha de inundação em certos trechos, locais em que não há a representação da água. Um dos motivos que pode justificar essa ocorrência é a pequena definição na escala do Mapa Digital de Terreno utilizado, pois a falta de detalhamento dele pode comprometer a demonstração dos resultados ao se analisar o trecho em planta. As Figuras 28 a 31 mostram que ao consultar o perfil transversal das seções em que ocorreram essas falhas, a presença

de água é identificada em todos os tempos de retorno considerados, porém em nenhuma situação ela ultrapassa os limites do rio, o que também pode explicar a descontinuidade.

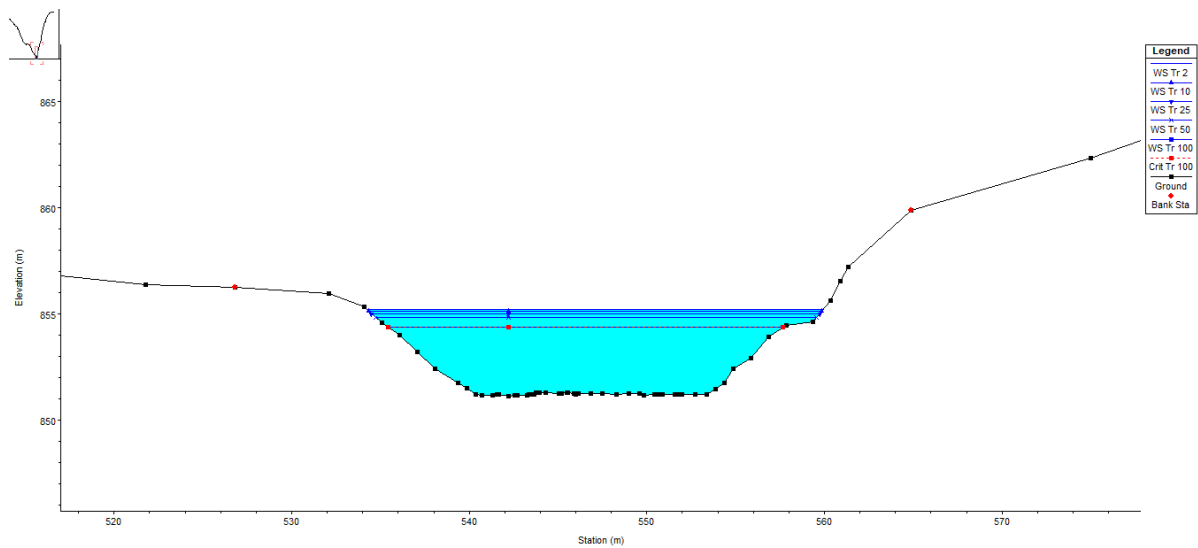


Figura 28 – Presença de água na seção 5442 para os diferentes tempos de retorno (AUTORA, 2024).

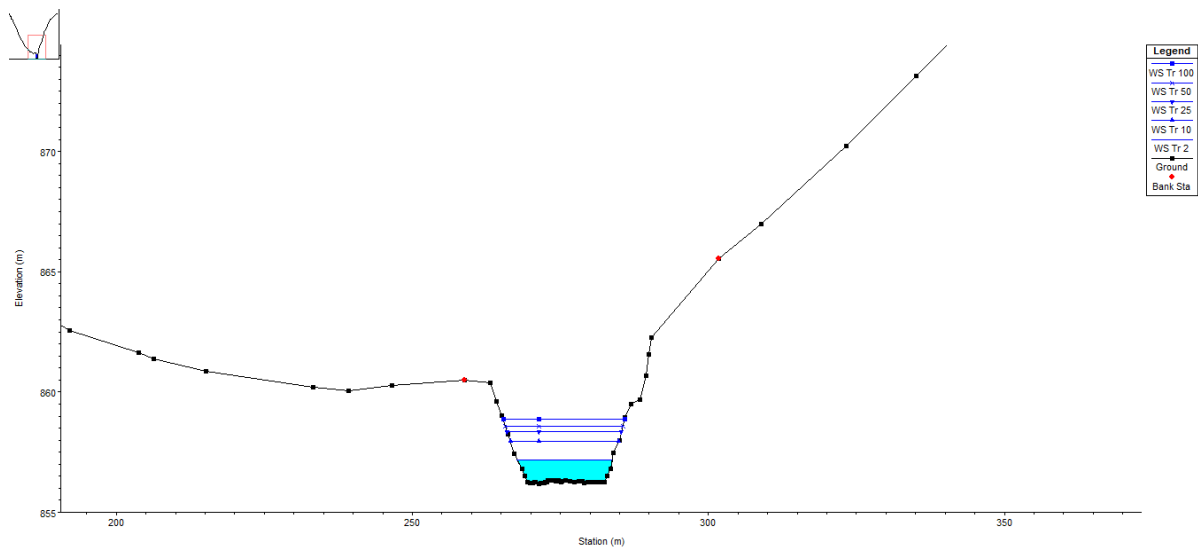


Figura 29 – Presença de água na seção 9597 para os diferentes tempos de retorno (AUTORA, 2024).

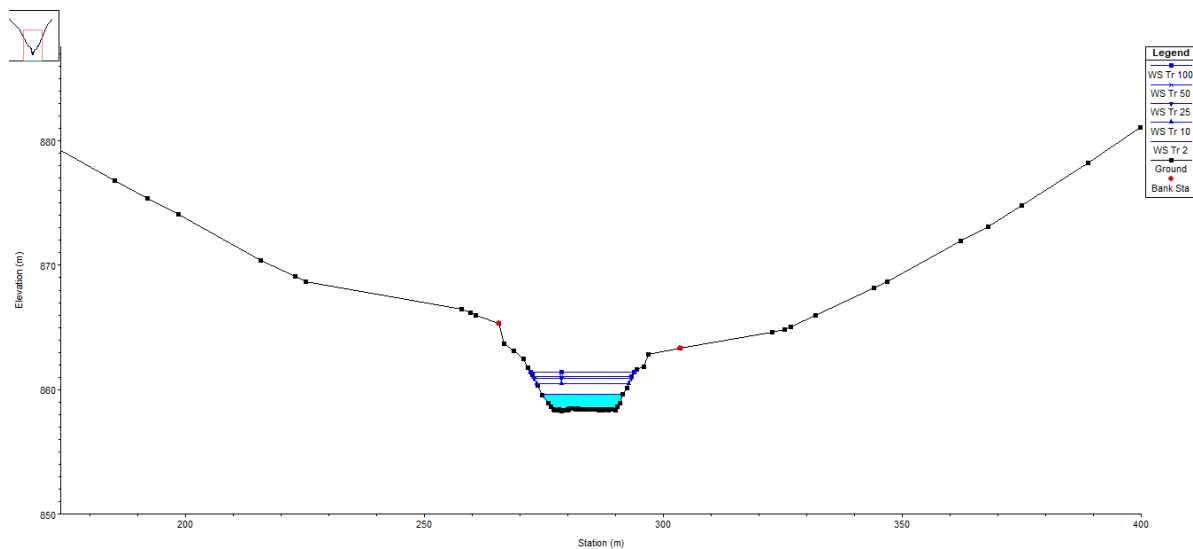


Figura 30 – Presença de água na seção 9676 para os diferentes tempos de retorno (AUTORA, 2024).

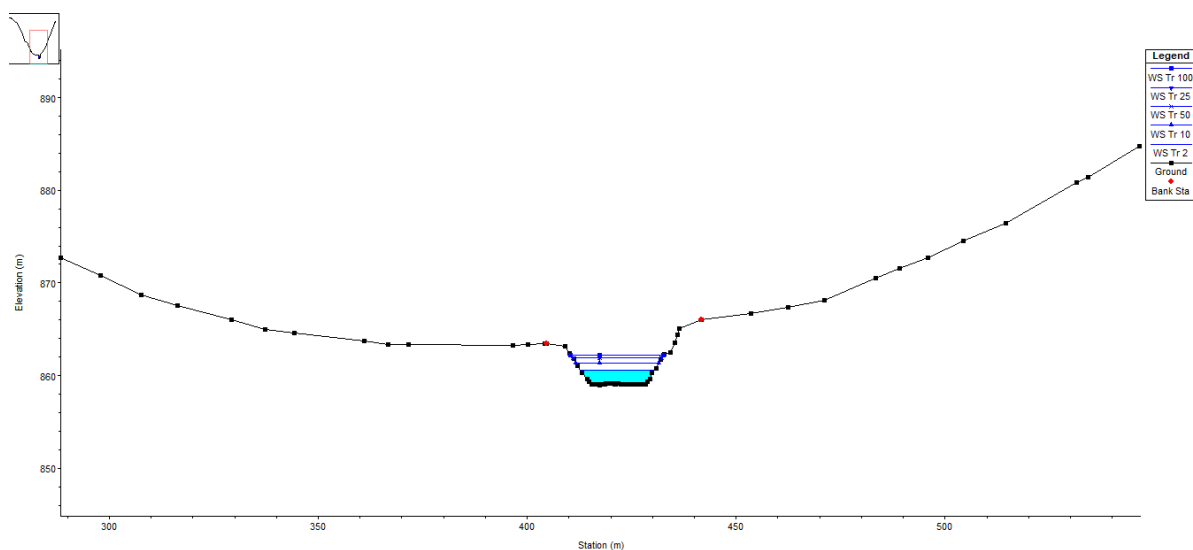


Figura 31 – Presença de água na seção 9859 para os diferentes tempos de retorno (AUTORA, 2024).

Além das seções transversais em 2D, o programa também gera um modelo 3D, que permite uma melhor visualização do terreno e da mancha de inundação. A Figura 32 traz essa vista para a situação do tempo de retorno de 100 anos.

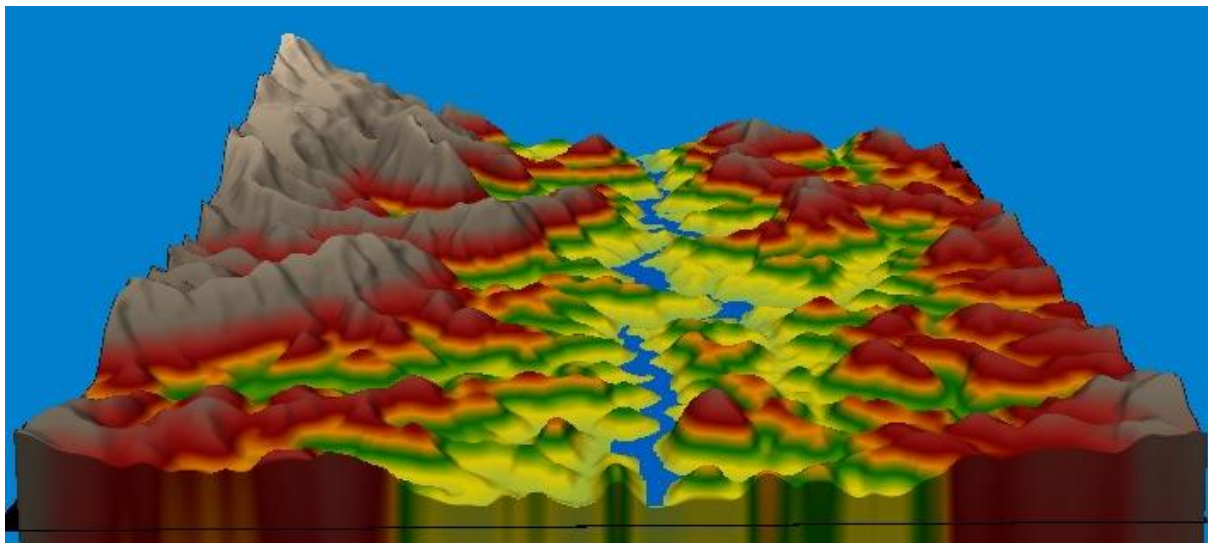


Figura 32 – Visualização 3D do terreno e da mancha de inundação para o Tr de 100 anos (AUTORA, 2024).

Esses resultados demonstram o que é visto no município quando ocorrem as inundações que afetam tantas pessoas. A Figura 33a se equivale à Figura 27, mas, ao fundo, está o mapa da cidade em vez do mapa de elevações do terreno. A partir dela, é possível visualizar a área da cidade atingida pela elevação do nível d'água do rio quando comparada à Figura 33b, que mostra a imagem de satélite do município.



(a)



(b)

Figura 33 – Proporção do município atingida pela mancha de inundação para o Tr de 100 anos (AUTORA, 2024).

Algumas regiões que já sofreram com as inundações, como as ruas Dr. Guilherme, Presidente Kennedy e Manoel João Pinto (AGITOMAS, 2012; SOU NOTÍCIA, 2022a; RADAR GERAL, 2022), fazem parte da área atingida pela mancha de inundação em algum dos tempos de retorno utilizados. Dessa forma, pode-se observar que o modelo obteve certa precisão em relação a localidades que podem ser

consideradas críticas, como pode ser observado na Figura 34, que é uma mancha de inundação observada e disponibilizada pela Defesa Civil do município de Itabirito.



Figura 34 – Mancha de inundação observada e disponibilizada pela Defesa Civil do município de Itabirito (DEFESA CIVIL DE ITABIRITO, 2024).

Ao se analisar fenômenos extremos, tem-se que os resultados com o uso do escoamento permanente são majorados, pois escolhe-se como parâmetro de entrada a maior ou a menor vazão encontrada para a região para eventos de cheia ou de seca,

respectivamente. Nessas condições, os resultados, ao serem utilizados para dimensionamento de componentes de drenagem ou de medidas de controle de inundação, por exemplo, agem a favor da segurança.

Como pode ser observado no Apêndice C, a área total inundada é superior a 167.000 m² para o Tr de 2 anos e superior a 225.000 m² para o Tr de 100 anos. Esse fato pode ser corroborado pelas ocorrências de cheias recorrentes na localidade, em que muitas pessoas são afetadas em suas casas ou comércios.

Dentre os métodos de controle de inundação ressalta-se a classificação em estruturais e não estruturais (CANHOLI, 2005) e de controle na fonte ou a jusante (TUCCI, 2003). Para fazer a opção de qual deles ou qual conjunto será aplicado a uma determinada situação, é preciso estudar suas aplicações e condições de uso. Dentro desse contexto, a Defesa Civil de Itabirito realizou, nos anos de 2022 e 2023, reuniões para apresentar planos de contingência e discutir com moradores e comerciantes as táticas que seriam aplicadas para auxiliar o controle das inundações (PREFEITURA ITABIRITO, 2022; PREFEITURA ITABIRITO, 2023), sendo as medidas adotadas as não estruturais. De forma geral, elas não visam impedir a ocorrência das inundações, mas sim prevenir que as pessoas sejam atingidas por elas. Considerando as simulações realizadas, a área impactada pelas cheias do rio Itabirito e o histórico que a cidade apresenta desses eventos, o ideal seria a aplicação de técnicas que evitassem que eles se repetissem de forma tão recorrente.

Devido ao fato de ser um rio que corta a cidade, torna-se inviável a construção de bacias de detenção ou de retenção, a menos que elas fossem feitas a montante, fora dos limites urbanos do município. No entanto, é plausível a execução de técnicas de recomposição da cobertura vegetal, restauração de calhas e demais métodos que tenham interferência nula ou mínima no município.

O presente trabalho pode ser utilizado como base para o estudo dessas técnicas, de forma a se avaliar as condições em que ocorrem as inundações e as regiões atingidas, por exemplo. Esses fatores são importantes na determinação de parâmetros para o dimensionamento de medidas estruturais, e os resultados obtidos podem ser comparados com aqueles obtidos na análise de impacto ao serem utilizadas essas medidas compensatórias. Assim como também, essa modelagem

serve de auxílio às medidas não-estruturais, como por exemplo, o zoneamento urbano, indicando as áreas propícias à ocupação e as que não são.

5 CONCLUSÃO

A cidade de Itabirito passa constantemente por problemas relacionados à inundação do rio Itabirito, e, após esses eventos, muito é discutido para a prevenção de repetições. A Figura 34 mostra como ela pode ser atingida e o quão importante se torna a aplicação de medidas preventivas e corretivas para a situação de cheia do rio.

Este trabalho teve como objetivo o mapeamento das áreas susceptíveis à inundação, tendo como base as vazões de pico para diferentes tempos de retorno. Como discutido, foi preciso aplicar simplificações ao modelo devido ao fato de não haver uma diversidade de dados que englobasse todos os parâmetros necessários e em toda a extensão do modelo, como os de vazão e a seção transversal do rio. No entanto, isso não foi um empecilho para a obtenção de bons resultados.

Os *softwares* utilizados, QGIS e HEC-RAS, se mostraram muito eficientes, desde os cortes nos mapas e a criação de *rasters* até a simulação final do modelo. O fato de eles serem gratuitos e de fácil utilização colaboraram para essa percepção.

Com relação à proposição de técnicas compensatórias, tem-se que é preciso um estudo mais aprofundado da região para a escolha das melhores soluções que sejam aplicáveis a ela. Isso ocorre porque o rio Itabirito tem sua extensão ao longo de toda a região urbanizada do município, e determinadas obras de drenagem podem não ser indicadas para alguns trechos. Assim, torna-se essencial a presença e a influência das autoridades locais na tomada de decisões acerca dos impactos causados pelas inundações e das formas de controle delas, tanto técnicas estruturais quanto não estruturais, como também diretamente nos pontos do rio mais propensos a tais eventos ou em regiões a jusante.

De forma geral, todas as etapas foram bem sucedidas, colaborando para o desempenho positivo do trabalho como um todo. Portanto, ele pode ser reproduzido para diferentes regiões, adaptando-se os valores para o local de estudo, de forma que os resultados sejam compatíveis com a situação em estudo.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se, como forma de complementação do presente trabalho, os seguintes estudos:

1. Análise utilizando outros coeficientes de Manning que atendam às indicações da literatura;
2. Batimetria de outras seções do rio, de forma que a representação seja a mais próxima possível da realidade;
3. Simulação em regime não permanente utilizando o hidrograma de cheia com auxílio do *software* HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System*);
4. Aprofundamento no conhecimento das opções de implantação de métodos de controle de inundação e nas possíveis consequências de cada um deles e
5. Avaliação dos impactos das mudanças climáticas em situações de inundações.

REFERÊNCIAS

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **HidroWeb: Apresentação**. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>. Acesso em: 22 de dez. 2023.

AGITOMAS. **Enchentes em Itabirito na Rua Dr. Guilherme em frente a Ricardo Eletro – 02/01/2012**. YouTube, 02 de janeiro de 2012. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ysdhngdubMU>. Acesso em 23 fev. 2024.

ALMEIDA, L. M. de. **As chuvas de verão**. Folha de São Paulo, São Paulo, 11 jan. 1997. Caderno de Opinião. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/fsp/1997/1/11/opinioao/7.html>. Acesso em 07 fev. 2024.

ANDRADE, C. J. da S. **Modelagem hidráulica e hidrológica para diagnóstico de áreas susceptíveis a inundações com limitações de dados fisiográficos e hidrometeorológicos: Estudo de caso Guidoal-MG**. 2017. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

ASCE – American Society of Civil Engineers. **Hydraulic Modeling: Concepts and Practice**. Virgínia: ASCE, 2000. 400p.

CANHOLI, A. P. **Drenagem Urbana e Controle de Enchentes**. 2ª edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. 384 p.

CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. **Inundação**. 2016. Disponível em: <http://www2.cemaden.gov.br/inundacao/>. Acesso em: 21 ago. 2023.

CLÍMACO, B. P. D. **Se essa rua fosse minha: patrimonialização de conjuntos urbanos em Itabirito (MG)**. 2011. 139 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Sociais) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

DECINA, T. G. T. **Análise de medidas de controle de inundações a partir da avaliação de cenários de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Córrego Gregório, São Carlos – SP**. 2012. 177 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

DEFESA CIVIL DE ITABIRITO. **Mancha de inundação dos rios e córregos do município.** Itabirito, 2024.

DEZOTTI, F. R. **Análise crítica da modelagem hidráulica do sistema de distribuição de água de São Gabriel/RS.** 108 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2023.

DIAS, M. A. F. da S.; SILVA, M. G. A. J. da. Para Entender Tempo e Clima. *In*: CAVALCANTI, I. F. de A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J. da; DIAS, M. A. F. da S. **Tempo e Clima no Brasil.** São Paulo: Oficina de Textos, 2009. cap. 1.

DHF, C. **Diagnóstico UTEs Rio Itabirito e Nascentes - Município de Itabirito.** Maceió, 2016.

DRZ, G. A. **Plano Municipal de Saneamento Básico.** Produto 2 – Diagnóstico da Situação do Saneamento Básico. Itabirito, 2013.

ENOMOTO, C. F. **Método para elaboração de mapas de inundação: Estudo de caso na bacia do rio Palmital, Paraná.** 2004. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

ESTRELA, C. **Itabirito sofre com a pior enchente da história da cidade.** De Fato, Jan. 2022. Disponível em: <https://defatoonline.com.br/itabirito-sofre-com-a-pior-enchente-da-historia-da-cidade/>. Acesso em: 23 nov. 2023.

GALL, M.; BORUFF, B. J.; CUTTER, S. L. Assessing Flood Hazard Zones in the Absence of Digital Floodplain Maps: Comparison of Alternative Approaches. **Natural Hazards Review**, v.8, n.1, p. 1-12, Feb. 2007.

GROISMAN, P.Y.; KNIGHT, R. W.; EASTERLING, D. R.; KARL, T.R.; HEGERL, G. C.; RAZUVAEV, V. N. Trends in Intense Precipitation in the Climate Record. **Journal of Climate**, v.18, p. 1326-1350, 2005.

FÓRNEAS, V. **Córrego transborda e ruas ficam inundadas com forte chuva em Itabirito.** O Tempo, Dez. 2022. Disponível em:

<https://www.otempo.com.br/cidades/corrego-transborda-e-ruas-ficam-inundadas-com-forte-chuva-em-itabirito-1.2774615>. Acesso em: 20 ago. 2023.

G1. Chuva alaga ruas de Itabirito e moradores são retirados de barco. G1, 02 jan. 2012. Disponível em: <https://g1.globo.com/minas-gerais/noticia/2012/01/chuva-alaga-ruas-de-itabirito-e-moradores-sao-retirados-de-barco.html>. Acesso em 07 fev. 2024.

GANDINI, M. L. T. **Análise estatística dos efeitos das mudanças climáticas em uma bacia hidrográfica.** 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2016.

GANDINI, M. L. T. **Utilização de modelo hidráulico para definição de áreas inundáveis com diferentes probabilidades na região do centro histórico da cidade de Mariana – MG.** 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Monitoramento do Uso e Cobertura da Terra.** 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/15831-cobertura-e-uso-da-terra-do-brasil.html?edicao=35138&t=downloads>. Acesso em: 03 out. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Panorama Censo 2022 – Itabirito (MG) – 3131901.** 2023. Disponível em: https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/?utm_source=ibge&utm_medium=home&utm_campaign=portal. Acesso em: 14 ago. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual Técnico de Uso da Terra.** Manuais Técnicos em Geociências, 3ª edição, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?id=281615&view=detalhes>. Acesso em: 02 de out. 2023.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D.A.; MARCELINO, I. P. V. de O.; MARCELINO, E. V.; GONÇALVES, E. F.; BRASSETTI, L. L. P.; GOERL, R. F.;

MOLLERI, G. S. F.; RUDORFF, F. de M. **Prevenção de desastres naturais: Conceitos básicos**. 1ª edição. Florianópolis: Organic Trading, 2006. 109 p.

LUZ, M. B. da. **Identificação de áreas propensas a inundação e análise da vulnerabilidade socioambiental na bacia hidrográfica do rio Cuiá/João Pessoa/PB**. 124f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

MAGALHÃES, I. A. L.; THIAGO, C. R. L.; AGRIZZI, D. V.; SANTOS, A. R. dos. Uso de geotecnologias para mapeamento de áreas de risco de inundação em Guaçuí, ES: uma análise comparativa entre dois métodos. **Caderno de Geociências**, v.8, n. 2, p. 63-70, Dez. 2011.

MARTINS, M. V. L. **Modelação matemática do escoamento não permanente nos cursos d'água litorâneos**. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

METEOBLUE. **Arquivo meteorológico Itabirito**. 2023. Disponível em: https://www.meteoblue.com/pt/tempo/historyclimate/weatherarchive/itabirito_brasil_3460954?fcstlength=1y&year=2022&month=8. Acesso em: 16 ago. 2023.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Enchentes**. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z/e/enchentes#:~:text=Muitas%20doen%C3%A7as%20podem%20ser%20transmitidas,locais%20de%20enchente%20e%20destro%C3%A7os>. Acesso em: 21 ago. 2023.

MYR, P. S. **Diagnóstico das Pressões Ambientais na Bacia do Rio Itabirito. Produto 2 – Estudo de caracterização geral da Bacia do Rio Itabirito**. Belo Horizonte, 2013a.

MYR, P. S. **Diagnóstico das Pressões Ambientais na Bacia do Rio Itabirito. Produto 3 – Estudos hidrológicos e hidrogeológicos da Bacia do Rio Itabirito e dos cenários de outorgas de recursos hídricos**. Belo Horizonte, 2013b.

MYSSIOR, S. **Caderno Técnico Conhecendo o Rio Itabirito**. Disponível em: Diagnóstico de fragilidades Hidroambientais realizado pelo Subcomitê da Bacia Hidrográfica do Rio Itabirito, pelo Comitê do Rio das Velhas e pela AGB Peixe Vivo:

<https://manuelzao.ufmg.br/wp-content/uploads/2018/08/6-caderno-itabirito-15jul2013-site-.pdf>. 2013. Acesso em 14 de ago. 2023.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Risco alto de inundações expõe consequências da crise climática**. 2022. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/172146-risco-alto-de-inunda%C3%A7%C3%B5es-exp%C3%B5e-consequ%C3%Aancias-da-crise-clim%C3%A1tica#:~:text=destrui%C3%A7%C3%A3o%20de%20casas.-,As%20inunda%C3%A7%C3%B5es%20destroem%20vidas%2C%20meios%20de%20subsist%C3%Aancia%2C%20a%20biodiversidade%2C,%C3%A9%20misturada%20com%20%C3%A1gua%20polu%C3%ADda>. Acesso em: 21 ago. 2023.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. de A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552 p.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4.ed. São Carlos: EESC-USP, 2006. 540 p.

PREFEITURA ITABIRITO. **Conheça Itabirito**. Itabirito: Prefeitura de Itabirito. Disponível em: <https://itabirito.mg.gov.br/descubra-itabirito/historia#:~:text=No%20fim%20do%20s%C3%A9culo%2017,em%20arraiais%2C%20freguesias%20e%20vilas>. Acesso em: 20 ago. 2023.

PREFEITURA ITABIRITO. **Prevenção contra enchentes: Defesa Civil de Itabirito realiza reunião com moradores e comerciantes**. Itabirito: Prefeitura de Itabirito, 2023. Disponível em: <https://itabirito.mg.gov.br/prevencao-contra-enchentes-defesa-civil-de-itabirito-realiza-reuniao-com-moradores-e-comerciantes>. Acesso em 09 fev. 2024.

PREFEITURA ITABIRITO. **Prevenção contra enchentes: Prefeitura de Itabirito apresenta plano de contingência ao comércio local**. Itabirito: Prefeitura de Itabirito, 2022. Disponível em: <https://itabirito.mg.gov.br/prevencao-contra-enchentes-prefeitura-de-itabirito-apresenta-plano-de-contingencia-ao-comercio-local>. Acesso em 09 fev. 2024.

PRESS, W. H.; TEUKOLKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY, B. P. **Métodos numéricos aplicados: rotinas em C++**. 3ed. Porto Alegre: Bookman. 2011. 1261p.

RADAR GERAL. **Itabirito: rio e córregos transbordam, encostas cedem, há ainda interdições e alagamentos de vias.** Radar Geral, 08 jan. 2022. Disponível em: <https://radargeral.com.br/itabirito/em-itabirito-rio-transborda-ha-ainda-encostas-que-cederam-interdicoes-e-alagamentos-de-ruas/>. Acesso em 24 fev. 2024.

RIBEIRO, A. G. As Escalas do Clima. **Boletim de Geografia Teórica**, v. 23, n. 46, p. 288-294, 1993.

RODRIGUES, A. **População de Itabirito tenta recuperar os estragos causados pelas chuvas.** Agência Brasil, 03 jan. 2012. Disponível em: <https://memoria.ebc.com.br/agenciabrasil/noticia/2012-01-03/populacao-de-itabirito-tenta-recuperar-os-estragos-causados-pelas-chuvas>. Acesso em 07 fev. 2024.

RODRIGUES, S. J. A. **Modelagem hidrológica para diagnóstico de áreas sujeitas a inundações: estudo de caso Sub-bacia do Córrego Carioca em Itabirito – MG.** 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5ª edição. Brasília: EMBRAPA, 2018. 356 p.

SANTOS JUNIOR, V. J, dos; SANTOS, C. O. A evolução da urbanização e os processos de produção de inundações urbanas. **Estação Científica**, v. 3, n. 1, p. 19-30, Jan.-Jun. 2013.

SARTORI, A., NETO, 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. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 10. 2005.

SOU NOTÍCIAS. **Chuvas: trânsito está impedido em quatro ruas de Itabirito; veja as alterações.** Sou Notícias, 30 nov. 2022. Disponível em: <https://www.sounoticia.com.br/noticia/100280/geral/chuvas-transito-esta-impedido-em-quatro-ruas-de-itabirito-veja-as-alteracoes-30112022>. Acesso em 24 fev. 2024.

SOU NOTÍCIAS. **Como está a cidade de Itabirito após um mês da enchente de 2022? Reveja umas fotos da enchente de 1997.** Sou Notícias, 10 fev. 2022. Disponível em: <https://www.sounoticia.com.br/noticia/90157/geral/como-esta-a-cidade-de-itabirito-apos-1-mes-da-enchente-de-2022-reveja-algumas-fotos-da-enchente-de-1997-10022022>. Acesso em 07 fev. 2024.

TUCCI, C. E. M. Inundações e Drenagem Urbana. *In*: TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. **Inundações Urbanas na América do Sul**. 1ª edição. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003. cap. 3, p. 45-141.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS – USACE. **HEC-RAS**. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>. Acesso em 17 fev. 2024.

APÊNDICE A

Vazões calculadas para as diferentes distribuições hidrológicas.

P{Q ≥ Q₀}	P{Q ≤ Q₀}	Q (m³/s)					
		Observada	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel Teórica	Gumbel Finita
0,0149	0,9851	350,651	253,61	267,53	264,34	237,16	251,93
0,0299	0,9701	259,330	210,85	223,61	216,89	206,29	218,42
0,0448	0,9552	186,914	187,33	198,22	191,26	188,09	198,66
0,0597	0,9403	169,309	171,25	180,37	173,95	175,08	184,53
0,0746	0,9254	159,286	159,11	166,65	160,99	164,90	173,48
0,0896	0,9104	158,820	149,39	155,52	150,70	156,52	164,38
0,1045	0,8955	124,774	141,31	146,18	142,18	149,37	156,62
0,1194	0,8806	119,175	134,40	138,15	134,95	143,13	149,84
0,1343	0,8657	118,834	128,38	131,11	128,66	137,57	143,81
0,1493	0,8507	113,725	123,04	124,86	123,11	132,56	138,37
0,1642	0,8358	113,090	118,25	119,23	118,15	127,98	133,40
0,1791	0,8209	109,937	113,90	114,14	113,67	123,76	128,82
0,1940	0,8060	108,687	109,92	109,48	109,58	119,85	124,57
0,2090	0,7910	108,687	106,26	105,19	105,82	116,19	120,60
0,2239	0,7761	108,687	102,86	101,23	102,35	112,74	116,86
0,2388	0,7612	104,364	99,69	97,54	99,11	109,49	113,33
0,2537	0,7463	102,913	96,72	94,11	96,09	106,41	109,98
0,2687	0,7313	99,522	93,92	90,89	93,25	103,47	106,79
0,2836	0,7164	92,556	91,28	87,86	90,58	100,65	103,74
0,2985	0,7015	92,135	88,78	85,01	88,05	97,96	100,81
0,3134	0,6866	90,589	86,40	82,32	85,65	95,36	97,99
0,3284	0,6716	90,577	84,13	79,77	83,36	92,86	95,28

continuação

$P\{Q \geq Q_0\}$	$P\{Q \leq Q_0\}$	Q (m³/s)					
		Observada	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel Teórica	Gumbel Finita
0,3433	0,6567	80,661	81,96	77,35	81,18	90,44	92,65
0,3582	0,6418	80,661	79,88	75,05	79,09	88,10	90,10
0,3731	0,6269	77,701	77,88	72,86	77,09	85,82	87,63
0,3881	0,6119	74,803	75,95	70,78	75,17	83,61	85,23
0,4030	0,5970	71,137	74,09	68,78	73,31	81,44	82,88
0,4179	0,5821	68,336	72,30	66,88	71,52	79,33	80,59
0,4328	0,5672	67,645	70,56	65,06	69,79	77,27	78,35
0,4478	0,5522	66,534	68,88	63,31	68,12	75,24	76,15
0,4627	0,5373	66,534	67,24	61,64	66,50	73,26	73,99
0,4776	0,5224	66,083	65,65	60,03	64,92	71,30	71,87
0,4925	0,5075	65,484	64,10	58,49	63,38	69,38	69,78
0,5075	0,4925	63,666	62,58	57,01	61,89	67,48	67,72
0,5224	0,4776	62,161	61,11	55,58	60,43	65,61	65,69
0,5373	0,4627	61,916	59,66	54,21	59,00	63,76	63,68
0,5522	0,4478	60,504	58,24	52,89	57,61	61,92	61,69
0,5672	0,4328	59,589	56,85	51,62	56,24	60,10	59,71
0,5821	0,4179	59,190	55,48	50,40	54,90	58,29	57,75
0,5970	0,4030	58,412	54,14	49,22	53,58	56,49	55,79
0,6119	0,3881	55,978	52,82	48,09	52,28	54,70	53,85
0,6269	0,3731	54,589	51,51	47,00	51,00	52,91	51,91
0,6418	0,3582	52,390	50,22	45,94	49,74	51,13	49,97
0,6567	0,3433	51,750	48,95	44,93	48,50	49,34	48,02
0,6716	0,3284	48,259	47,68	43,95	47,26	47,54	46,08

continuação

$P\{Q \geq Q_0\}$	$P\{Q \leq Q_0\}$	Q (m³/s)					
		Observada	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel Teórica	Gumbel Finita
0,6866	0,3134	46,830	46,43	43,02	46,04	45,74	44,12
0,7015	0,2985	46,798	45,19	42,11	44,83	43,93	42,15
0,7164	0,2836	46,359	43,95	41,24	43,62	42,10	40,16
0,7313	0,2687	43,513	42,71	40,41	42,42	40,25	38,15
0,7463	0,2537	40,273	41,48	39,61	41,23	38,37	36,12
0,7612	0,2388	40,150	40,24	38,84	40,03	36,46	34,05
0,7761	0,2239	37,662	39,00	38,10	38,83	34,52	31,94
0,7910	0,2090	36,917	37,75	37,39	37,62	32,54	29,79
0,8060	0,1940	36,673	36,49	36,72	36,40	30,50	27,58
0,8209	0,1791	34,008	35,22	36,08	35,17	28,40	25,30
0,8358	0,1642	31,662	33,93	35,47	33,92	26,23	22,94
0,8507	0,1493	27,091	32,60	34,89	32,64	23,96	20,48
0,8657	0,1343	26,488	31,25	34,34	31,34	21,59	17,90
0,8806	0,1194	25,682	29,85	33,83	29,99	19,08	15,17
0,8955	0,1045	25,612	28,39	33,35	28,58	16,39	12,26
0,9104	0,0896	23,342	26,85	32,90	27,10	13,49	9,10
0,9254	0,0746	22,221	25,21	32,50	25,53	10,28	5,62
0,9403	0,0597	20,853	23,42	32,13	23,81	6,64	1,68
0,9552	0,0448	20,346	21,41	31,80	21,88	2,36	-2,97
0,9701	0,0299	20,211	19,03	31,53	19,58	-3,04	-8,84
0,9851	0,0149	19,377	15,82	31,32	16,49	-10,98	-17,45

APÊNDICE B

Valores das frequências para cada distribuição pelo teste KS.

Q (m³/s)	P{Q ≥ Q ₀ } (%)					
	Observada	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel Teórica	Gumbel Finita
350,7	1,49	0,37	0,41	0,49	0,11	0,19
259,3	2,99	1,37	1,70	1,60	0,90	1,28
186,9	4,48	4,51	5,37	4,81	4,60	5,69
169,3	5,97	6,18	7,15	6,46	6,78	8,12
159,3	7,46	7,44	8,42	7,69	8,43	9,91
158,8	8,96	7,50	8,48	7,75	8,52	10,00
124,8	10,45	14,42	14,95	14,46	17,54	19,33
119,2	11,94	16,12	16,43	16,10	19,67	21,45
118,8	13,43	16,23	16,53	16,20	19,81	21,59
113,7	14,93	17,97	18,04	17,89	21,95	23,71
113,1	16,42	18,20	18,23	18,11	22,23	23,98
109,9	17,91	19,40	19,25	19,27	23,67	25,39
108,7	19,40	19,89	19,67	19,75	24,26	25,97
108,7	20,90	19,89	19,67	19,75	24,26	25,97
108,7	22,39	19,89	19,67	19,75	24,26	25,97
104,4	23,88	21,71	21,20	21,51	26,40	28,05
102,9	25,37	22,36	21,74	22,14	27,15	28,77
99,5	26,87	23,96	23,07	23,69	28,98	30,53
92,6	28,36	27,63	26,08	27,25	33,02	34,38
92,1	29,85	27,87	26,28	27,48	33,28	34,63
90,6	31,34	28,76	27,01	28,35	34,24	35,53
90,6	32,84	28,77	27,01	28,36	34,24	35,54

continuação

Q (m³/s)	P{Q ≥ Q ₀ } (%)					
	Observada	Log- Normal	Pearson	Log- Pearson	Gumbel Teórica	Gumbel Finita
80,7	34,33	35,25	32,30	34,69	40,85	41,74
80,7	35,82	35,25	32,30	34,69	40,85	41,74
77,7	37,31	37,45	34,11	36,85	42,97	43,72
74,8	38,81	39,72	35,99	39,09	45,11	45,71
71,1	40,30	42,79	38,54	42,12	47,89	48,28
68,3	41,79	45,27	40,64	44,58	50,07	50,30
67,6	43,28	45,90	41,18	45,21	50,62	50,80
66,5	44,78	46,93	42,07	46,23	51,50	51,62
66,5	46,27	46,93	42,07	46,23	51,50	51,62
66,1	47,76	47,35	42,44	46,66	51,86	51,95
65,5	49,25	47,92	42,93	47,22	52,34	52,39
63,7	50,75	49,68	44,47	48,98	53,80	53,74
62,2	52,24	51,17	45,80	50,47	55,03	54,87
61,9	53,73	51,42	46,02	50,72	55,23	55,05
60,5	55,22	52,86	47,32	52,16	56,39	56,12
59,6	56,72	53,80	48,18	53,11	57,14	56,81
59,2	58,21	54,22	48,57	53,53	57,47	57,11
58,4	59,70	55,04	49,33	54,36	58,11	57,70
56,0	61,19	57,67	51,82	57,00	60,13	59,56
54,6	62,69	59,20	53,31	58,55	61,29	60,63
52,4	64,18	61,68	55,81	61,07	63,12	62,32
51,8	65,67	62,41	56,56	61,81	63,66	62,81
48,3	67,16	66,48	60,97	65,96	66,57	65,49

continuação

Q (m³/s)	P{Q ≥ Q ₀ } (%)					
	Observada	Log- Normal	Pearson	Log- Pearson	Gumbel Teórica	Gumbel Finita
46,8	68,66	68,18	62,92	67,69	67,76	66,59
46,8	70,15	68,22	62,96	67,73	67,78	66,61
46,4	71,64	68,74	63,58	68,27	68,15	66,95
43,5	73,13	72,16	67,86	71,78	70,49	69,12
40,3	74,63	76,08	73,38	75,81	73,11	71,56
40,2	76,12	76,23	73,61	75,97	73,21	71,65
37,7	77,61	79,21	78,53	79,05	75,18	73,50
36,9	79,10	80,10	80,15	79,96	75,77	74,04
36,7	80,60	80,39	80,70	80,26	75,96	74,22
34,0	82,09	83,49	87,53	83,48	78,00	76,15
31,7	83,58	86,12	96,26	86,20	79,75	77,81
27,1	85,07	90,82	-	91,06	83,00	80,92
26,5	86,57	91,39	-	91,64	83,41	81,32
25,7	88,06	92,12	-	92,40	83,95	81,84
25,6	89,55	92,18	-	92,46	83,99	81,89
23,3	91,04	94,10	-	94,41	85,47	83,33
22,2	92,54	94,95	-	95,27	86,18	84,02
20,9	94,03	95,90	-	96,23	87,01	84,85
20,3	95,52	96,23	-	96,55	87,32	85,15
20,2	97,01	96,31	-	96,64	87,40	85,23
19,4	98,51	96,82	-	97,13	87,89	85,72

APÊNDICE C

Área inundada por seção e total para diferentes tempos de retorno em anos.

Estação	Área inundada (m ²)				
	Tr = 2	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 100
15944	627,24	630,06	632,99	687,96	829,76
15816	1020,39	1023,53	1026,8	1081,52	1218,22
15638	1273,98	1277,82	1281,78	1347,57	1510,94
15555	1630,39	1634,8	1639,36	1714,38	1899,91
15456	1913,61	1919,28	1925,12	2021,22	2257,76
15399	2480,47	2489,46	2498,71	2649,56	3015,71
15310	2336,14	2345,28	2354,65	2510,21	2894,55
15163	1791,1	1795,9	1800,83	1883,96	2088,99
15065	2110,96	2115,15	2119,42	2191,47	2368,09
14956	2240,49	2244,66	2248,91	2320,76	2497,32
14875	1737,65	1741,48	1745,4	1813,91	1983,6
14778	1711,5	1717,49	1723,63	1830,66	2094,38
14704	2557,49	2564,61	2571,88	2697,66	3004,7
14639	3921,39	3928,83	3936,44	4067,38	4386,3
14558	3469,99	3477,39	3484,94	3615,55	3933,47
14513	1450,53	1453,99	1457,53	1524,62	1696,31
14416	1058,81	1060,99	1063,21	1110,8	1230,26
14295	463,33	463,53	463,75	501,17	596,18
14144	946,81	947,45	948,09	992,66	1106,96
14015	1698,86	1699,99	1701,15	1770,98	1949,9
13899	1494,82	1495,67	1496,57	1556,88	1710,65
13729	2273,63	2275,05	2276,54	2371,25	2609,92
13543	1360,77	1361,4	1362,04	1426,08	1591,31
13408	1823,12	1823,92	1824,75	1901,56	2097,81
13237	1312,31	1312,74	1313,22	1373,68	1526,54

continuação

Estação	Área inundada (m²)				
	Tr = 2	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 100
13117	1580,78	1581,28	1581,83	1649,23	1820,29
13035	1651,86	1652,36	1652,9	1721,11	1895,27
12879	2208,05	2208,68	2209,33	2290,84	2497,95
12754	2347,07	2347,75	2348,5	2440,58	2677,32
12625	1736,71	1737,06	1737,43	1801,2	1969,89
12508	1896,17	1896,58	1897,04	1968,09	2151,53
12388	1666,52	1666,86	1667,24	1739,34	1926,49
12252	2262,16	2262,65	2263,18	2357,06	2599,19
12152	2958,89	2959,43	2960,08	3063,68	3327,2
12029	3443,02	3443,57	3444,2	3545,55	3802,25
13408	1823,12	1823,92	1824,75	1901,56	2097,81
13237	1312,31	1312,74	1313,22	1373,68	1526,54
13117	1580,78	1581,28	1581,83	1649,23	1820,29
13035	1651,86	1652,36	1652,9	1721,11	1895,27
12879	2208,05	2208,68	2209,33	2290,84	2497,95
12754	2347,07	2347,75	2348,5	2440,58	2677,32
12625	1736,71	1737,06	1737,43	1801,2	1969,89
12508	1896,17	1896,58	1897,04	1968,09	2151,53
12388	1666,52	1666,86	1667,24	1739,34	1926,49
12252	2262,16	2262,65	2263,18	2357,06	2599,19
11874	3966,24	3966,88	3967,6	4084,07	4379,94
11745	2085,09	2085,37	2085,7	2167,94	2379,8
11549	1697,2	1697,29	1697,41	1762,08	1927,43
11373	2097,81	2098	2098,17	2182,43	2398,23
11292	1562,02	1562,02	1562,02	1638,49	1832,63
11203	582,98	27,9	40,07	49,45	56,3
11092	519,63	310,49	311,31	312,16	313,3

continuação

Estação	Área inundada (m²)				
	Tr = 2	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 100
10953	1103,25	775,98	778,97	782,07	786,14
10763	916,41	596,73	598,5	600,34	602,76
10636	1752,04	1330,45	1333,32	1336,33	1340,27
10484	19,96	526,94	526,94	526,94	526,94
10215	159,86	419,11	533,19	820,07	991,29
10114	33,73	95,95	150,42	307,39	394,83
9994	63,86	124,42	149,1	248,85	309,7
9859	24,11	38,02	49,38	49,18	55,94
9676	19	34,24	42,62	45,9	52,49
11549	1697,2	1697,29	1697,41	1762,08	1927,43
11373	2097,81	2098	2098,17	2182,43	2398,23
11292	1562,02	1562,02	1562,02	1638,49	1832,63
11203	582,98	27,9	40,07	49,45	56,3
11092	519,63	310,49	311,31	312,16	313,3
10953	1103,25	775,98	778,97	782,07	786,14
10763	916,41	596,73	598,5	600,34	602,76
10636	1752,04	1330,45	1333,32	1336,33	1340,27
10484	19,96	526,94	526,94	526,94	526,94
10215	159,86	419,11	533,19	820,07	991,29
9597	13,43	26,57	33,9	38,27	44,22
9513	75,32	88,36	121,44	187,53	441,93
9412	555,94	633,08	722,36	845,39	1213,15
9401	589,9	670,05	763,2	893,11	1301,68
9246	420,5	499,9	592,01	719,04	1074,4
9074	1079,28	1187,36	1310,1	1475,62	1916,22
8975	896,88	1002,45	1123,1	1287,59	1742,55
8734	1357,64	1537,4	1738,97	2007,45	2711,13

continuação

Estação	Área inundada (m²)				
	Tr = 2	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 100
8519	2247,33	2480,9	2740,13	3080,98	3948,2
8385	341,69	415,71	507,44	645,41	1203,74
8244	212,4	253,5	308,58	393,8	657,61
8109	807,1	911,63	1040	1229,53	1907,78
7951	541,16	619,93	716,82	855,89	1249,38
7816	667,05	762,74	879,83	1047,09	1513,87
9597	13,43	26,57	33,9	38,27	44,22
9513	75,32	88,36	121,44	187,53	441,93
9412	555,94	633,08	722,36	845,39	1213,15
9401	589,9	670,05	763,2	893,11	1301,68
9246	420,5	499,9	592,01	719,04	1074,4
9074	1079,28	1187,36	1310,1	1475,62	1916,22
8975	896,88	1002,45	1123,1	1287,59	1742,55
8734	1357,64	1537,4	1738,97	2007,45	2711,13
8519	2247,33	2480,9	2740,13	3080,98	3948,2
8385	341,69	415,71	507,44	645,41	1203,74
8244	212,4	253,5	308,58	393,8	657,61
8109	807,1	911,63	1040	1229,53	1907,78
7951	541,16	619,93	716,82	855,89	1249,38
7816	667,05	762,74	879,83	1047,09	1513,87
7677	908,17	1024,25	1166,14	1368,29	1931,85
7669	920,39	1038,05	1181,44	1385	1951,99
7531	1034,04	1202,82	1405,14	1687,35	2448,45
7528	1026,83	1198,57	1404,29	1690,67	2461,01
7429	1310,98	1517,95	1767,25	2113,41	3037,1
7363	1155,65	1345,63	1574,77	1893,99	2752,92
7289	1432,77	1735,02	2096,38	2595,07	3902,52

continuação

Estação	Área inundada (m²)				
	Tr = 2	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 100
7277	1737,87	2019,31	2357,48	2826,54	4071,98
7110	2008,67	2249,38	2537,3	2936,06	3999,41
6970	2200,64	2421,71	2683,98	3044,69	4001,15
6968	2217,37	2438,88	2701,26	3061,65	4014,37
6964	2240,73	2462,24	2724,61	3084,79	4031,9
6955	2272,8	2491,41	2751,06	3108,89	4053,08
6694	1749,55	1979,37	2260,26	2655,92	3728,42
6470	2785,79	3037,47	3337,73	3752,77	4848,15
6459	2809,75	3063,37	3364,64	3778,75	4863,49
6112	927,84	1032,44	1161,06	1345,05	1861,82
5696	295,2	335,42	388,06	467,91	710,49
5692	280,31	319,15	370,63	449,2	688,86
5452	77,86	76,35	80,16	118,72	272,64
5442	77,01	74,71	71,68	66,93	55,97
5071	1176,28	1187,79	1199,4	1211,49	1227,13
4783	2128,14	2144,17	2160,36	2177,27	2199,14
4485	3416	3442,22	3468,67	3496,17	3531,6
4332	1567,54	1580,11	1592,82	1606,05	1623,16
4052	4597,34	4622,98	4648,9	4675,77	4710,42
3762	996,97	1006,02	1015,2	1024,79	1037,19
3759	902,77	911,22	919,78	928,72	940,32
3383	3808,1	3831,79	3855,79	3880,75	3912,97
3112	2675,25	2691,83	2708,63	2726,16	2748,8
3051	1754,63	1768,8	1783,14	1798,13	1817,45
2984	1120,2	1132,25	1144,51	1157,36	1173,98
2936	771,78	778,98	786,32	794,01	804
2876	524,38	530,03	535,81	541,9	549,86

continuação

Estação	Área inundada (m²)				
	Tr = 2	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 100
2859	459,68	464,22	468,86	473,77	480,19
2638	942,09	948,01	954,03	960,37	968,64
2376	607,69	613	618,5	624,35	632,05
2303	273,65	273,65	273,65	273,65	273,65
2067	810,41	810,53	810,64	810,77	810,92
1795	629,45	629,26	629,08	628,88	628,63
1416	3687,2	3687,17	3687,17	3687,14	3687,14
1182	5854,92	5854,92	5854,92	5854,92	5854,92
1148	4206,07	4206,07	4206,07	4206,07	4206,07
1062	562,03	1204,54	1513,3	1743,71	1971,34
899	564,12	856,85	1011,31	1131,56	1253,39
865	292,23	492,78	605,7	695,51	788,21
795	211,2	348,96	426,03	487,25	549,69
403	511,62	809,36	977,23	1114,1	1257,37
5	37,25	67,25	82,91	95,78	109,28
Total (m²)	167425,03	173294,32	180506,09	193398,57	225475,85