



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



Fernando César Soares Feliciano

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA E MAPEAMENTO DE
ÁREAS DE INUNDAÇÃO URBANA DO MUNICÍPIO DE RIO
PIRACICABA/MG**

Ouro Preto

2022

Modelagem Hidrodinâmica e Mapeamento de Áreas de Inundação Urbana do
Município de Rio Piracicaba/MG

Fernando César Soares Feliciano

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

Data da aprovação: 07/06/2022

Área de concentração: Hidráulica

Orientadora: Prof^a. D.Sc. Ana Letícia Pilz de Castro - UFOP

Ouro Preto

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F314m Feliciano, Fernando Cesar Soares.

Modelagem hidrodinâmica e mapeamento de áreas de inundação urbana do município de Rio Piracicaba/MG. [manuscrito] / Fernando Cesar Soares Feliciano. - 2022.

55 f.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Letícia Pilz de Castro.

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

1. Solos - Inundação. 2. Escoamento. 3. Modelos hidráulicos. 4. Hidrodinâmica. 5. Programas de computador - HEC-RAS. I. Castro, Ana Letícia Pilz de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Fernando César Soares Feliciano

Piracicaba/MG

Modelagem hidrodinâmica e mapeamento de áreas de inundação urbana do município de Rio

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

Aprovada em 07 de junho de 2022.

Membros da banca

Dra. - Ana Letícia Pilz de Castro (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dra. Aline de Araújo Nunes - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Msc. - Maria Luiza Teófilo Gandini - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Ana Letícia Pilz de Castro, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 27/06/2022.



Documento assinado eletronicamente por **Ana Letícia Pilz de Castro, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/06/2022, às 10:48, 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 **0351829** e o código CRC **EBFE9D39**.

Dedico este trabalho a população do município de Rio Piracicaba – MG, em especial a todos que já sofreram alguma perda decorrente de inundações na região.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e a minha família, por todo amor e apoio, que me permitiram completar esta importante etapa da minha vida. Aos professores do DECIV, em especial à minha orientadora Prof^a. Dr^a. Ana Letícia Pilz de Castro, por todas as lições e ensinamentos oferecidos durante toda graduação. A Universidade Federal de Ouro Preto, pelo ensino gratuito e de qualidade, sem o qual este trabalho não seria possível. A equipe de Recursos Hídricos da Tetra Tech, por todas as experiências, aprendizados e por me ensinar o amor ao estudo da hidrologia e hidráulica.

RESUMO

O comportamento hidrológico e hidráulico de cursos d'água influenciam diretamente o dia a dia da população de forma geral, principalmente das populações ribeirinhas, que sofrem constantemente com eventos de cheias extremas e extravasamento do leito menor dos rios. Este estudo, realizado no município de Rio Piracicaba - MG, situado às margens do rio de mesmo nome e regularmente afetado por episódios de inundações, aborda a análise de frequência das vazões da estação fluviométrica (56610000) localizada na região, e da modelagem hidráulica do trecho no *software* HEC-RAS. O trabalho visou caracterizar o escoamento do Rio Piracicaba no município, e mapear, através da criação de manchas de inundação e da análise de risco hidrodinâmico, as regiões mais susceptíveis aos impactos causados por um evento de transbordamento da calha do rio. Os resultados apresentados, além de descrever e classificar o tipo de escoamento da região, também fornecem uma análise estatística das vazões observadas historicamente no local, definindo tempos de retorno (TR) para estes eventos, parâmetro estatístico que caracteriza o intervalo estimado entre ocorrências de igual ou maior magnitude dos fenômenos analisados. Desta forma, obteve-se para o TR de 1.000 anos, pior cenário modelado, uma espacialização de 2,03km² para a mancha de inundação, classificada em sua quase totalidade como insegura para veículos, pessoas e edifícios. As informações aqui apresentadas, fornecem dados para possíveis intervenções público-privadas visando a atenuação dos impactos decorrentes de inundações no município.

Palavras-chaves: Inundação, Escoamento, Hidráulico, Hidrodinâmico, HEC-RAS.

ABSTRACT

The hydrological and hydraulic behavior of watercourses directly influence the day to day of the population in general, especially the riverside populations, who constantly suffer from extreme flood events and overflowing of the riverbed. This study, conducted in the county of Rio Piracicaba - MG, located on the banks of the river of the same name and regularly affected by episodes of flooding, approach the frequency analysis of the flows at the fluviometric station (56610000), located in the region, and the hydraulic modeling of the stretch in HEC-RAS. The work aimed to characterize the Piracicaba River flow in the county, and to map, through the creation of flood maps and hydrodynamic risk analysis, the most susceptible regions to impacts caused by an overflow event in the river channel. The results presented, besides describing and classifying the type of runoff in the county, also provide a statistical analysis of the flows historically observed at the site, defining return periods for these events, a statistical parameter that characterizes the estimated interval between occurrences of equal or greater magnitude of the phenomena analyzed. Thus, for the return period of 1000 year, the worst modeled scenario, a spatialization of 2.03km² was obtained for the flood stain, classified almost entirely as unsafe for vehicles, people and buildings. The information presented here provides data for possible public-private interventions aimed at mitigating the impacts resulting from flooding in the county.

Keywords: Flood, Runoff, Hydraulic, Hydrodynamic, HEC-RAS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Características dos leitos de rios (TUCCI, 2003).....	5
Figura 2 – Obtenção da curva de energia específica conduto aberto (BAPTISTA e LARA, 2014).....	10
Figura 3 – Curva geral de Risco Hidrodinâmico (Adaptado de SMITH, DAVEY e COX, 2014).	16
Figura 4 – Localização da área de estudo (AUTOR, 2022).	21
Figura 5 – Hidrografia da área de estudo (AUTOR, 2022).....	22
Figura 6 – Distância Rio Piracicaba e Estação 83591 (AUTOR, 2022).	23
Figura 7 – Temperaturas médias da Estação 83591 (AUTOR, 2022).	24
Figura 8 – Umidade relativa média da Estação 83591 (AUTOR, 2022).....	25
Figura 9 – Precipitação média da Estação 83591 (AUTOR, 2022).....	25
Figura 10 – Evaporação média da Estação 83591 (AUTOR, 2022).	26
Figura 11 – Modelo Digital de Elevação da área de estudo (AUTOR, 2022).....	27
Figura 12 – Mapa de elevações da área de estudo (AUTOR, 2022).	28
Figura 13 – Região da malha adotada (AUTOR, 2022).....	29
Figura 14 – Uso e Ocupação do Solo Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).	30
Figura 15 – Eixo “Breakline” - Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).....	35
Figura 16 – Perfil Terreno (Eixo “Breakline”) - Rio Piracicaba (AUTOR, 2022). .	35
Figura 17 – Resultados WSE (Elevação da Superfície d’água) (AUTOR, 2022).	36
Figura 18 – Resultados velocidades do escoamento – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).	37
Figura 19 – Resultados número de Froude – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022)....	38

Figura 20 – Espacialização da Área Inundável – TR 2 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).	39
Figura 21 – Espacialização da Área Inundável – TR 5 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).	39
Figura 22 – Espacialização da Área Inundável – TR 10 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).	40
Figura 23 – Espacialização da Área Inundável – TR 50 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).	40
Figura 24 – Espacialização da Área Inundável – TR 100 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).	41
Figura 25 – Espacialização da Área Inundável – TR 200 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).	41
Figura 26 – Espacialização da Área Inundável – TR 1.000 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).	42
Figura 27 – Classificação Risco Hidrodinâmico – TR 2 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).	44
Figura 28 – Classificação Risco Hidrodinâmico – TR 5 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).	44
Figura 29 – Classificação Risco Hidrodinâmico – TR 10 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).	45
Figura 30 – Classificação Risco Hidrodinâmico – TR 50 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).	45
Figura 31 – Classificação Risco Hidrodinâmico – TR 100 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).	46
Figura 32 – Classificação Risco Hidrodinâmico – TR 200 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).	46

Figura 33 – Classificação Risco Hidrodinâmico –TR 1.000 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).47

Figura 34 – Região tida como mais susceptível a inundações (AUTOR, 2022). 50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Normais climatológicos da Estação 83591 (AUTOR, 2022).....	23
Tabela 2 – Valores de Manning adotados (AUTOR, 2022).....	30
Tabela 3 – Vazões máximas anuais estação 56610000 (ANA, 2022).	31
Tabela 4 – Vazões obtidas pelo SEAF (AUTOR, 2022).....	33
Tabela 5 – Testes de Ajuste das Séries (AUTOR, 2022).....	34
Tabela 6 – Cenários Modelo Hidráulico (AUTOR, 2022).	34
Tabela 7 – Áreas das Manchas de Inundação (AUTOR, 2022).....	42
Tabela 8 – Classificação quanto ao Risco Hidrodinâmico (Adaptado de SMITH, DAVEY e COX, 2014).	43
Tabela 9 – Legenda Risco Hidrodinâmico (Adaptado de SMITH, DAVEY e COX, 2014).	43
Tabela 10 – Áreas da Classificação Hidrodinâmica (AUTOR, 2022).	47

LISTA DE SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

GEV - *Generalized Extreme Value*

HEC-RAS - *Hydrologic Engineers Corps – River Analysis System*

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

MDE - Modelo Digital de Elevação

PAE - Plano de Ação Emergencial

SEAF - Sistema Especialista de Análise de Frequência

TR - Tempo de Retorno

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	2
1.1.1	Objetivos Específicos.....	3
2	Revisão Bibliográfica.....	4
2.1	Eventos de Inundação	4
2.2	Classificação do escoamento.....	5
2.2.1	Classificação do escoamento - Tempo como Referência (Permanente e Transiente)	6
2.2.2	Classificação do escoamento - Espaço como Referência (Uniforme, Gradualmente variado, Bruscamente variado)	7
2.2.3	Classificação do escoamento - Tipo de escoamento (Laminar, Transição e Turbulento).....	8
2.2.4	Classificação do escoamento - Regime de escoamento (Froude) ...	9
2.3	Coeficiente de Manning	12
2.4	Modelagem Hidráulica - HEC-RAS.....	13
2.5	Risco Hidrodinâmico.....	15
2.6	Drenagem Urbana	17
3	Metodologia.....	20
3.1	Área de Estudo	20
3.1.1	Hidrografia da Área	21
3.1.2	Climatologia da Área.....	22
3.2	Modelo Digital de Elevação (MDE)	26

3.3	Malha.....	28
3.4	Coeficiente de Manning	29
3.5	Vazões e Condições de Contorno	31
4	Resultados e Discussões	33
4.1	Análise de Frequência - Vazões	33
4.2	Modelo Hidráulico	35
4.3	Mapeamento de Áreas Inundáveis	38
4.4	Risco Hidrodinâmico.....	42
4.5	Análise dos Resultados	48
5	Conclusão	52
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	53
	Referências.....	54

1 INTRODUÇÃO

A importância do uso dos recursos hídricos para o desenvolvimento humano é de difundido saber; falar de água é falar de sobrevivência. O líquido está presente desde a composição do planeta terra até a composição de parte do nosso organismo. Segundo dados disponibilizados pela ANA (2019), no Brasil a água é utilizada principalmente para irrigação de lavouras, abastecimento público, atividades industriais, geração de energia, extração mineral, aquicultura, navegação, turismo e lazer. No país cerca de 93 trilhões de litros de água são captados anualmente de fontes superficiais e subterrâneas para atender aos diversos usos consuntivos (ANA, 2019).

A gestão dos recursos tem por objetivo garantir a disponibilidade e qualidade da água para seus mais diversos usos. Por se tratar de um recurso natural, em todas as regiões do planeta existem permanentes ameaças ao ciclo hidrológico, quantidade e qualidade de água. Essas ameaças decorrem devido ao uso excessivo e ou imprudente da água para várias atividades humanas. Desta forma, o conceito da gestão descreve a procura permanente de inovações tecnológicas e a adoção de medidas estruturais e não-estruturais para a gestão integrada e preditiva das águas (TUNDISI, 2006).

O estudo do ciclo hidrológico, engloba os comportamentos hidrológicos e hidráulicos da região, influenciando diretamente a tomada de decisões para a gestão dos recursos hídricos. Estes estudos, desenvolvidos no campo da engenharia, permeiam toda investigação relativa ao domínio da água, desde o processo de distribuição e movimentação do líquido na região de interesse, assim permitindo o completo entendimento das possíveis adversidades causadas, impactos socioeconômicos e potenciais intervenções para mitigação e contingência de danos.

O município de Rio Piracicaba, escopo deste trabalho, fica localizado em Minas Gerais. E assim como em toda a Região Sudeste, seu período chuvoso ocorre entre os meses de outubro a março. Com a chegada dos meses de pluviosidade acentuada na região, em virtude da proximidade do município com o leito do rio de mesmo nome,

são observadas repetidamente a ocorrência de cheias extremas no canal do rio. Em breve análise do retrospecto, considerando os três anos prévios à elaboração deste estudo (2019, 2020 e 2021), foram identificadas ocorrências de inundações no município. Os eventos impactam diretamente o cotidiano da população local, que sofre com constantes prejuízos materiais, perda de vidas e interrupção de atividades econômicas nas áreas inundadas.

Além da chegada dos meses chuvosos é importante destacar a influência causada pelas mudanças climáticas para periodicidade destes eventos pluviométricos extremos para o Brasil, em linhas gerais, nas regiões onde comumente são observados eventos de pluviosidade acentuada existe uma tendência de aumento das chuvas (CARVALHO et al., 2014). Segundo estudo e modelagem climática realizada por Dalagnol et al. (2022) para região, os efeitos da industrialização e do aquecimento global aumentaram em 70% a probabilidade de ocorrer precipitação em volumes muito acima dos esperados quando comparado a cenários com temperaturas médias mais baixas. Fato este verificado ao observar o recente histórico de chuvas no Sudeste, marcado por eventos pluviométricos onde são observadas precipitações de proporções anuais no intervalo de um mês.

Visando mitigar os danos causados por eventos associados ao transbordamento da calha de rios e o conseqüente alagamento das regiões urbanas que ocupam as marginais destes cursos d'água, são adotadas diferentes medidas, sendo que o mapeamento de áreas de risco é tido como de grande relevância entre as demais, visto que permite o entendimento prévio de regiões expostas a desastres naturais, evitando sua ocupação ou permitindo a intervenção com obras pontuais para contenção de danos.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo geral realizar a caracterização do comportamento hidráulico e hidrodinâmico do trecho do rio Piracicaba, localizado na cidade de mesmo nome no estado de Minas Gerais.

1.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Análise de frequência dos dados obtidos na estação fluviométrica Rio Piracicaba (56610000), para obtenção das vazões associadas a diferentes tempos de retorno;
- Modelagem hidráulica do trecho, por meio do *software* HEC-RAS;
- Produção de mapas de manchas de inundação para o município e
- Análise do risco hidrodinâmico causado pelo escoamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Eventos de Inundação

A urbanização no Brasil teve seu início no século XIX, motivada pela implantação de indústrias nos centros urbanos e a queda na demanda de funcionários após o início da aplicação de máquinas para o trabalho no campo. Neste contexto foi observado nos anos 70 um divisor social para o Brasil; a partir desta data a população em centros urbanos superou a população no campo, sendo seguida pela constante crescente nestes dados até os dias de hoje. Atualmente, segundo dados do Censo (IBGE, 2010), cerca de 85% da população reside em centros urbanos.

Os impactos produzidos pela intensa urbanização nos últimos 50 anos do país são de grande importância para se entender a influência antrópica na dinâmica das catástrofes provocadas por eventos de origem natural. Nos aspectos da gestão de águas, os impactos no ciclo hidrológico acontecem de maneira intensa, com fortes alterações, principalmente pela modificação das superfícies de escoamento, canalização dos fluxos antes difusos e aumento de poluição e contaminação do ar, desta forma atuando diretamente sobre a configuração de escoamento e intensificando as mudanças climáticas (TUCCI, 2003).

Com foco nas inundações urbanas, as águas pluviais podem provocar inundações essencialmente devido a dois processos, que podem ocorrer de maneira isolada ou combinados. O primeiro deles, denominado inundações de áreas ribeirinhas é resultado da geometria apresentada por canais naturais, estes canais possuem duas calhas (Figura 1). O leito menor identifica a porção onde o escoamento acontece com maior frequência, apresentando o risco de transbordamento de aproximadamente 2 anos, enquanto o leito maior representa aquele onde as enchentes acontecem devido a eventos chuvosos extremos. Deste modo as inundações de áreas ribeirinhas ocorrem pela ocupação urbana indevida das áreas que compreendem o leito maior, assim, a submersão das estruturas urbanas ocorre pelo processo natural, no qual o rio escoar pelo seu leito maior em eventos chuvosos de maior magnitude (TUCCI, 2003).

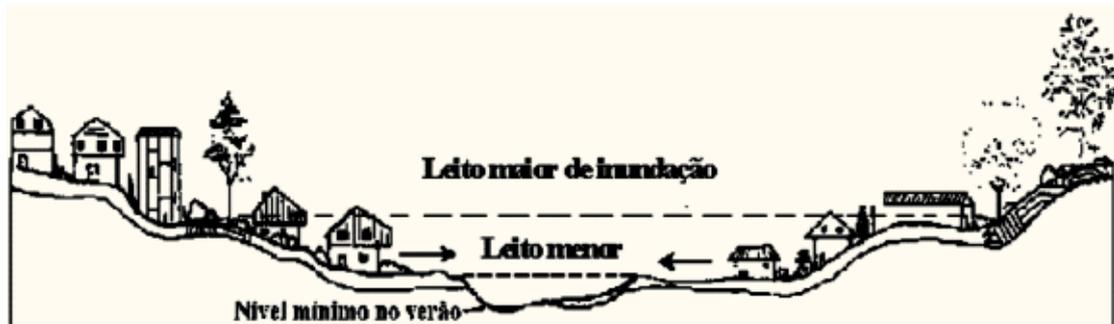


Figura 1 – Características dos leitos de rios (TUCCI, 2003).

O segundo processo de inundação, denominado de enchentes devido à urbanização, retratam o processo principalmente causado pela alteração do uso do solo na região, provocada pelo desenvolvimento urbano. Durante o processo de construção das cidades, zonas antes ocupadas por vegetação e solo exposto são substituídas pela implantação de materiais impermeáveis, como asfalto e concreto. A impermeabilização da área impede a infiltração da água no solo, que se transforma de maneira quase integral em escoamento superficial. Os impactos da urbanização também atuam sobre o escoamento natural da água, devido à obstrução de corpos hídricos por lixos, sedimentos, obras de pontes ou taludes de estradas (obstruindo o fluxo) e projetos ou obras de drenagem mal realizadas (TUCCI, 2003).

2.2 Classificação do Escoamento

Os escoamentos em canais abertos são aqueles sujeitos ao contato direto com a atmosfera, ou seja, sua principal característica é estarem diretamente influenciados pela pressão atmosférica atuando no líquido. Diferentemente dos escoamentos em condutos forçados, onde as condições de contorno, como geometria e rugosidade das paredes são bem definidas, no estudo de canais abertos estas condições podem variar, tornando as teorias que definem seu estudo ainda mais complexas.

Tendo em vista o estudo do escoamento em canais de seção aberta, pode-se dividi-los essencialmente em dois grupos, o primeiro deles denominado canais naturais, como rios e córregos, já o segundo deles diz respeito ao escoamento em

canais artificiais, criados pelo homem, como canais de irrigação e aquedutos. Desta forma, tendo identificado o escoamento em canais abertos pode-se classificá-los em relação aos parâmetros que os governam.

2.2.1 Classificação do Escoamento - Tempo como Referência (Permanente e Transiente)

Ao se tratar do escoamento em canais, a variação dos parâmetros que o definem, como velocidade e pressão podem ser definidas em relação ao tempo, ou seja, se permanecem constantes ou não ao longo de sua variação temporal.

Quando estes parâmetros se conservam durante o tempo pode-se classificar o escoamento como permanente. Neste tipo de escoamento, ao analisar-se uma seção imóvel do canal, é possível identificar que durante toda duração do fluxo sua velocidade e pressão se mantêm constantes, e, por conseqüente, outros parâmetros como vazão e profundidade também permanecem invariáveis. Este tipo de escoamento pode ser observado em leitos de rios durante o tempo de estiagem; durante este período as vazões no leito são providas basicamente pelo aporte de lençóis subterrâneos que apresentam variações temporais muito lentas, assim garantindo uma vazão e profundidades que podem ser consideradas constantes (SUÁREZ, 2000).

Desta forma, para os escoamentos tidos como permanentes, as derivadas parciais de qualquer variável que seja dependente em relação ao tempo, são consideradas nulas. Porém, ao se considerarem duas seções consecutivas, ou seja, uma variação no espaço é possível observar variações nos valores dos parâmetros, variações estas, obtidas durante o deslocamento das partículas entre as seções (SUÁREZ, 2000).

Em contrapartida ao regime descrito como permanente, os regimes onde os parâmetros de velocidade e pressão não se mantêm com a variação do tempo são classificados como transientes ou não permanentes. Neste tipo de regime o comportamento do fluxo é variável quando se considera a mesma seção do canal em

relação ao tempo; a diferença da velocidade do escoamento nos diferentes instantes é diretamente retratada na variação de parâmetros como profundidade e vazão. Este tipo de escoamento é o mais frequente em canais de seção aberta, uma vez que o escoamento destes canais está sobre constante aporte de vazões como chuvas e demais escoamentos superficiais.

Como importantes exemplos do escoamento transiente se destacam, além das ondas provocadas por chuvas já citadas anteriormente, as ondas geradas pela operação de usinas hidrelétricas, operação de eclusas de navegação, rupturas de barragens e ondas de maré em estuários. Em todos os casos citados é possível observar um pico de vazão em determinado instante de tempo decaindo até o fim do volume mobilizado ou fechamento das comportas. (SILVA, 2013).

2.2.2 Classificação do Escoamento - Espaço como Referência (Uniforme, Gradualmente variado, Bruscamente variado)

De forma análoga ao tópico anterior também é possível assumir a variação do espaço como referência para análise do escoamento em canais. Assim, ao analisar-se a variação dos parâmetros que definem o escoamento no decurso da calha, pode-se definir o denominado regime uniforme, que geralmente se refere a um tipo específico do escoamento permanente. O regime uniforme define o fluxo em que os vetores de velocidade locais são paralelos entre si e constantes ao longo de sua trajetória, ou seja, ao compararem-se os pontos consecutivos em uma mesma trajetória observa-se que seus vetores de velocidade são similares em módulo, direção e sentido.

O regime de escoamento uniforme não é comumente encontrado em canais naturais, podendo ser observados apenas em períodos de estiagem, em cursos d'água retilíneos, com baixas declividades e sem aportes de afluentes significativos. Já em condutos fechados é possível observar o escoamento uniforme em tubulações longas e de diâmetro constante (SUÁREZ, 2000).

Em contrapartida ao escoamento uniforme, o escoamento em que os vetores de velocidade do escoamento não são paralelos entre si é definido como escoamento variável. Neste tipo de escoamento, ao analisar-se a linha d'água em um instante de tempo invariável e as seções que a compõe, são observadas divergências nestes vetores, sendo diretamente reproduzidas em grandezas mais notórias como profundidade e vazão do trecho.

As taxas de variações dos parâmetros do fluxo permitem classificar o escoamento variável em duas categorias. A primeira delas, denominada gradualmente variado determina quando as variações dos parâmetros do fluxo acontecem de forma lenta e gradual, como confluências e estuários. Já a segunda categoria diz respeito ao cenário em que há mudança brusca destes parâmetros, sendo denominada de regime bruscamente variado. O regime bruscamente variado pode ser observado em trechos de pequeno comprimento, como vertedores e trechos de transição (SILVA, 2013).

2.2.3 Classificação do Escoamento - Tipo de Escoamento (Laminar, Transição e Turbulento)

Uma classificação importante dentro da mecânica dos fluidos está relacionada à direção da trajetória das partículas do escoamento, sendo determinado como escoamento laminar ou turbulento. O primeiro deles descreve a situação em que as partículas do fluido tendem a percorrer trajetórias paralelas e com o mínimo de agitação das várias camadas que o compõe; no escoamento laminar o fluido se move em camadas, uma camada escorregando sobre a adjacente. De forma oposta ao laminar, o regime turbulento é relativo ao escoamento com as partículas do fluido percorrendo trajetórias irregulares e curvilíneas; neste regime, o curso do fluido acontece de forma caótica, com turbulência e formação de redemoinhos, resultando em uma consequente dissipação de energia do escoamento.

Dentro da engenharia hidráulica o Número de Reynolds é utilizado para classificar o escoamento de fluidos quanto à sua turbulência. O coeficiente, determinado por Osborne Reynolds, um físico e engenheiro de origem irlandesa, no ano de 1883, define a relação entre as forças de inércia do fluxo e a força viscosa, propriedade física

que caracteriza a resistência de um fluido ao escoamento. Desta maneira, por se tratar de um quociente entre forças, o número de Reynolds resulta no coeficiente adimensional apresentado na Equação 1 (PORTO, 2006).

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{V R_h}{\nu} \quad (1)$$

Onde:

V = velocidade média na seção considerada (m/s);

ρ = massa específica do fluido (kg/m³);

μ = viscosidade dinâmica do fluido (Pa . s);

R_h = raio hidráulico (m) e

ν = viscosidade cinemática do fluido (m²/s).

Considerando o escoamento em canais de seção aberta pode-se considerar que para $Re < 500$ o regime é classificado como laminar, $Re > 2000$ regime turbulento e para os valores de $500 < Re < 2000$ tem-se o chamado regime de transição (PORTO, 2006).

De forma a exemplificar os tipos de escoamento, pode-se considerar o regime turbulento como aquele de maior frequência na natureza; o escoamento é formado por altas velocidades médias, decorrentes de altas declividades, como os fluxos observados em descidas de água em degraus. Já o regime laminar descreve o escoamento ordenado geralmente associado a trechos de baixa declividade, como o formado ao despejar um copo de água sobre o capô de um carro.

2.2.4 Classificação do Escoamento - Regime de Escoamento (Froude)

Uma importante propriedade de um escoamento é sua energia, que compreende o somatório das cargas cinéticas, altimétricas e piezométricas. Ao considerar-se a quantidade de energia que compreende o fluxo, medida a partir do fundo do canal, é possível obter a Equação 2, da energia específica, determinada pelo engenheiro Boris Bakhmeteff em 1912 e apresentada a seguir:

$$E = y + \frac{Q^2}{2gf(y)^2} \quad (2)$$

Onde:

y = profundidade do escoamento (m);

Q = vazão (m³/s);

g = aceleração da gravidade (m/s²) e

$f(y)$ = área, dada em função da profundidade do escoamento (m²).

Desta forma, a Figura 2 apresentada a seguir mostra a obtenção da curva de energia específica de um escoamento em canal aberto, onde no eixo das ordenadas é representada a profundidade do escoamento e nas abscissas a energia (BAPTISTA e LARA, 2014).

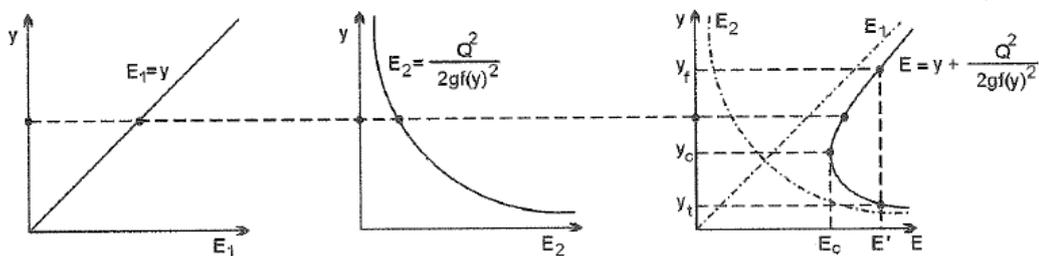


Figura 2 – Obtenção da curva de energia específica conduto aberto (BAPTISTA e LARA, 2014).

Observando a equação que define a energia específica, é possível identificar o ponto de menor energia do escoamento, denominada energia crítica (E_c) e sua profundidade associada, denominada profundidade crítica (y_c). Logo, pode-se subentender a presença de uma declividade, velocidade e vazão associadas ao escoamento para formação desta condição crítica para o fluxo (BAPTISTA e LARA, 2014).

Pode-se determinar duas regiões para o escoamento, uma localizada acima do ponto crítico e uma localizada abaixo. A região localizada acima é denominada de

regime subcrítico ou fluvial, já a zona situada abaixo descreve o regime supercrítico ou torrencial. Pode-se concluir que para os mesmos valores de energia os escoamentos subcríticos apresentam maiores profundidades, enquanto os escoamentos supercríticos apresentam menores lâmina d'água. Desta maneira, evidenciando que para escoamentos fluviais estão associadas declividades menos acentuadas, enquanto para os escoamentos supercríticos estão associadas as declividades mais acentuadas.

A determinação do escoamento quanto à energia é realizada através de um coeficiente adimensional denominado de Número de Froude, definido pelo engenheiro William Froude, com a relação entre as forças de inércia do escoamento e a força da gravidade. A Equação 3 apresenta a obtenção desse coeficiente.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL_c}} \quad (3)$$

Em que:

V = velocidade média na seção (m/s);

g = aceleração da gravidade (m/s²) e

L_c = comprimento característico do escoamento (m).

A obtenção da equação de Froude, parte da derivação da equação da energia específica e aplicação da equação da continuidade, resultando Equação 4 (BAPTISTA e LARA, 2014).

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{V^2}{gL_c} = 1 - Fr^2 \quad (4)$$

Como observado na curva de energia específica, a energia para o escoamento crítico é a mínima para o escoamento; logo, a derivada em relação a y é nula e conseqüentemente seu Froude igual a 1. Assim, quando observam-se as profundidades características dos regimes fluviais e torrenciais em relação à derivada parcial da energia, para os valores de $Fr > 1$ o regime é classificado como supercrítico e $Fr < 1$ o regime é subcrítico (BAPTISTA e LARA, 2014).

2.3 Coeficiente de Manning

O engenheiro francês Antoine Chézy, em 1769, definiu a força de resistência ao escoamento como proporcional ao quadro de velocidades e a superfície molhada para escoamentos em canais abertos. A fórmula de Chézy, Equação 5, apresentada a seguir, é considerada a primeira fórmula de atrito fluido que se tem conhecimento (BAPTISTA e LARA, 2014).

$$V = C\sqrt{Rh \cdot I} \quad (5)$$

Onde:

V = velocidade média do escoamento (m/s);

C = coeficiente de Chézy;

Rh = raio hidráulico (m) e

I = declividade (m/m).

Devido à dificuldade para definição do fator de resistência (C) na formulação de Chézy, houve a necessidade de novas formas para definição desta força no escoamento em canais abertos. Neste cenário, anos mais tarde, decorre a concepção da formulação de Manning, considerada a de maior difusão na área técnica de hidráulica atualmente para este parâmetro. Desenvolvida por Gauckler, em 1867, e atribuída a Manning e Strikler, a expressão define o fator de resistência como uma relação entre o raio hidráulico e o denominado coeficiente de rugosidade de Manning (n), que representa a resistência ao escoamento associada a parede do canal. A Equação 6 define essa relação (BAPTISTA e LARA, 2014).

$$C = \frac{1}{n} Rh^{1/6} \quad (6)$$

Combinando a Equação 6 com a equação da continuidade obtém-se a fórmula de Manning, Equação 7, apresentada a seguir e muito aplicada para cálculos hidráulicos de canais em seção aberta.

$$Q = \frac{1}{n} A Rh^{2/3} I^{1/2} \quad (7)$$

Onde:

Q = vazão (m³/s);

A = área molhada (m²);

Rh = raio hidráulico (m);

I = declividade (m/m) e

n = coeficiente de rugosidade de Manning.

2.4 Modelagem Hidráulica - HEC-RAS

A modelagem e simulação numéricas são importantes ferramentas para engenharia moderna. Os modelos numéricos permitem, através da capacidade computacional, reproduzir e garantir a previsão de situações com diferentes níveis de complexidade e abrangência. Os modelos computacionais permitem a análise de diferentes cenários de forma segura, evitando ou complementando a montagem de modelos físicos que requerem investimentos financeiros e tempo para sua montagem.

No emprego de modelos numéricos para a área técnica de hidráulica observa-se uma grande dificuldade para garantir a confiabilidade da simulação, devido à complexidade para aquisição, definição e parametrização dos dados de entrada que definem sua montagem. No que tange à composição da modelagem, diversos fatores influenciam a obtenção dos resultados, como: esquemas numéricos de resolução, hipóteses de base e simplificativas, condições de simulação, calibração, interface entre sistemas e *softwares*, entre outros (SILVA, 2013).

Um dos *softwares* para simulações hidráulicas de grande aplicação para resolução de modelos hidráulicos é o HEC-RAS (*Hydrologic Engineers Corps – River Analysis System*), desenvolvido em sua primeira versão em 1995, pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA. O pacote computacional efetua cálculos hidráulicos em sistemas de canais naturais ou artificiais e se baseia na resolução das equações de Saint-Venant uni ou bidimensionais, para resolução dos modelos (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2020).

Entre as aplicações do *software* pode-se citar (SILVA, 2013):

- Estudos para determinação da área de inundação dos rios e de proteção contra as enchentes;
- Efeitos dos diversos obstáculos hidráulicos como pontes, bueiros, vertedores de barragens, diques e outras estruturas hidráulicas;
- Análise das alterações nos perfis da superfície d'água devido a modificações da geometria do canal e
- Múltiplos perfis de superfície d'água (modelagem de cenários para diferentes condições hidráulicas e hidrológicas), erosão em pontes e operação de barragens em sequência.

Operando sobre modelos unidimensionais e bidimensionais o programa é capaz de efetuar os cálculos dos perfis de superfície da água em escoamento permanente e não permanente, em canais com superfície livre. Esses perfis podem ser calculados em regimes subcrítico, supercrítico e misto, podendo ocorrer mudanças entre os regimes durante o escoamento (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2020). O programa se destaca por ser um *software* de referência na área técnica, gratuito e de facilidade para uso.

Para definição do modelo HEC-RAS 2D, como o abordado neste estudo, são necessários os seguintes dados:

- Projeção de Referência Espacial: a definição da configuração de um sistema de coordenadas espaciais não é imprescindível para o modelo, mas agrega ao trabalho no campo do georreferenciamento;
- Dados geométricos: representam o contorno geométrico dos diversos perfis transversais das seções e das distâncias medidas entre essas seções; os dados podem ser inseridos em forma de coordenadas pela aba *Cross Section* ou pela inserção de um MDT (Modelo Digital de Terreno) em formato vetorial, para a modelagem 2D;
- Malha: define a região onde acontece o escoamento do modelo; a malha é formada por uma matriz retangular onde as variáveis que definem a condição de escoamento como velocidade, profundidade e outros

parâmetros são calculados pela solução dos sistemas de equações em cada elemento que compõe a malha;

- Condições de contorno: são condições de escoamento definidas nas extremidades de montante e jusante do sistema, para que o modelo utilize como ponto de partida aos cálculos hidráulicos. O programa permite a utilização de diversos tipos de condições de contorno como: elevação da superfície da água, profundidade crítica, profundidade normal e curva chave;
- Definição do coeficiente de Manning: para definição do modelo é importante a definição do coeficiente de rugosidade de Manning para cada região de escoamento. O *software* permite a inserção de um *shapefile* de uso do solo onde serão atribuídos os coeficientes para cada classificação e
- Tipo de escoamento: definição do tipo de escoamento em permanente, pelo menu *Steady flow data* e não permanente, pelo menu *Unsteady flow data*.

Para modelos mais detalhados é possível inserir dados mais avançados, como: a definição de regiões impermeáveis, infiltrações no solo pelo método *Soil Conservation Service-Curve Number* (SCS-CN), transporte de sedimentos e leito móvel, entre outros.

2.5 Risco Hidrodinâmico

Um importante parâmetro relacionado à análise dos efeitos decorrentes de uma inundação e na interpretação da ameaça promovida pelo evento de propagação de cheias está relacionado ao risco hidrodinâmico, que qualifica a susceptibilidade que pessoas, prédios, veículos ou outras estruturas, inseridos no trecho de inundação, tendem a serem empurrados ou levados pela correnteza (SMITH, DAVEY e COX, 2014).

Os riscos de dano que inundações podem representar estão associados à força com que a água flui ao longo da superfície de inundação. De maneira geral, observa-

se que ondas mais rápidas e profundas causam mais dano que ondas rasas e menos velozes, assim, a força da água pode ser caracterizada como o valor máximo do produto da velocidade “V” pela altura “H” de água (SMITH, DAVEY e COX, 2014).

Considerando melhores práticas de gestão de planícies de inundação, apresentados pelo estudo de Smith, Davey e Cox (2014), foi desenvolvido um trabalho com foco na determinação das características em uma inundação que expõe pessoas, veículos e prédios a perigos e danos. Os autores apresentam um compilado de pesquisas sobre o tema, onde são definidos limites e criadas curvas de vulnerabilidade para cada classe de objeto, visando sua classificação espacial ao risco hidrodinâmico. Por fim, é realizada a combinação de uma série de curvas de vulnerabilidade e perigos, resultando na classificação geral de risco de inundação. A seguir, a Figura 3 apresenta as curvas combinadas de risco expostas pelo estudo.

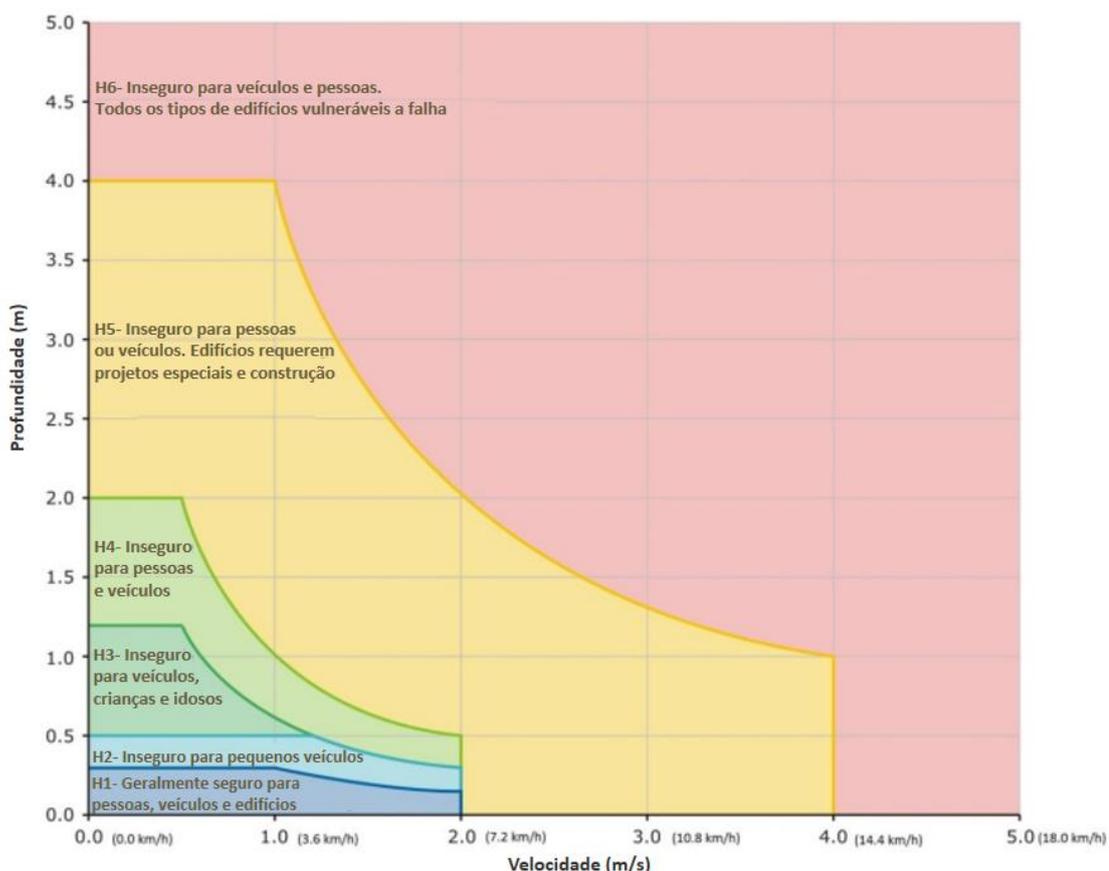


Figura 3 – Curva geral de Risco Hidrodinâmico (Adaptado de SMITH, DAVEY e COX, 2014).

Em análise das curvas, evidencia-se que o perigo e o potencial de danos aumentam em razão da taxa de ascensão da inundação e pelo ganho de velocidade do escoamento. Desta forma, para o estudo considera-se que:

- H1 - Pessoas, veículos e edifícios geralmente estão seguros, mas podem eventualmente adquirir instabilidade em escoamentos com profundidades até 0,3 m e velocidades até 2 m/s;
- H2 - No que tange a escoamentos caracterizados com baixas velocidades (até 2 m/s), pequenos carros podem sobrenadar em profundidades superiores a 0,3 m;
- H3 - Em escoamentos de baixa velocidade, até 2 m/s, veículos, crianças e idosos podem ficar instáveis quando as profundidades são maiores que 0,5 m;
- H4 - Ainda considerando baixas velocidades, até 2 m/s, adultos expostos a inundação podem ficar instáveis quando as profundidades ultrapassarem 1,2 m;
- H5 - Edifícios projetados sem particularidades estruturais estão em risco de falha quando expostos as profundidades maiores que 2,0 m e com velocidades acima de 2 m/s e
- H6 - Veículos, pessoas e todos os tipos de edifícios, estão propensos à falha quando as profundidades são maiores que 4 m e as velocidades de escoamento estão acima de 4 m/s.

2.6 Drenagem Urbana

Conforme já mencionado no item 2.1 o processo desordenado de urbanização provoca a redução da capacidade de armazenamento natural de água no solo. Observa-se que este processo também provoca o aumento de velocidade dos escoamentos superficiais, o que reduz o tempo de concentração da bacia e conseqüentemente provoca maiores picos de vazão a jusante. Desta forma, as vazões afluentes da bacia são, geralmente, enviadas a um corpo hídrico receptor, localizado a jusante da bacia, que pode não ser capaz de conter o volume em sua calha e causar complicações nas regiões que o margeiam.

O desenvolvimento de projetos de drenagem adequados para os centros urbanos é de grande importância para gestão das cidades, visto que, quando ineficazes influenciam a vida de grande parcela da população, destruindo bens materiais e até mesmo podendo resultar em mortes. É possível observar, especialmente quando consideram-se as notícias que circulam nas mídias durante os meses de dezembro a março, uma crescente na frequência de eventos de inundações urbanas, sendo agravados pelos inúmeros problemas da infraestrutura de drenagem dos municípios, quem vem se tornando obsoleta e insuficiente para o crescimento acelerado das cidades. Embora existam conceitos e diretrizes desenvolvidos pelos estudos hidrológicos e hidráulicos, que constam nos planos diretores de drenagem, a aplicação destes foi por anos negligenciada pelos órgãos públicos, resultando esta recente regularidade dos desastres observados.

A elaboração do plano diretor de drenagem urbana tem por objetivo garantir o manejo de águas dentro do município; porém, quando muitas vezes estes não atendem à alta demanda gerada pela população, se fazem necessárias aplicações de medidas não convencionais. Estas medidas englobam soluções que abordam de forma distinta o conceito convencional de drenagem, que se refere a drenagem por meio de obras de galerias e canalização, que apenas promovem o afastamento rápido do escoamento, muitas vezes apenas transferindo o problema para jusante da bacia. A drenagem não convencional diz respeito à implantação de estruturas, obras e dispositivos com conceitos diferenciados de projeto, as medidas podem estar associadas à drenagem convencional para sua adequação ou otimização (CANHOLI, 2014).

Entre as medidas não convencionais mais difundidas pode-se citar (CANHOLI, 2014):

- Medidas que visam incrementar o processo da infiltração, como sistemas de biorretenção e trincheiras de infiltração;
- Retardar o escoamento superficial, aumentando o tempo que o volume leva para chegar ao corpo hídrico. O processo acontece através de reservatórios de contenção, popularmente conhecidos como piscinões;

- Retardar o fluxo nas calhas dos córregos e rios;
- Sistemas de diques para contenção de cheias, como barragens de regularização de vazões e
- Derivar os escoamentos, promovendo o *bypass* em áreas afetadas, como em transposições de rios.

Atualmente também se destaca a aplicação de novas tecnologias sustentáveis para otimização das drenagens urbanas como: a instalação de tanques para armazenamento e reuso residencial de águas pluviais, valetas gramadas que permitem a condução e retenção de volumes, asfaltos porosos que permitem a infiltração de água nas camadas de base da via, entre outros.

As aplicações das soluções não convencionais devem ser avaliadas quanto ao contexto causador do problema, observando os aspectos de confiabilidade, flexibilidade e funcionalidade da solução. Outro importante aspecto está relacionado à viabilidade econômica da solução, ou seja, avaliar se o investimento de capital para realização das obras é viável ou não. O custo de um sistema de drenagem urbana compreende os gastos com investimento, operação e manutenção e riscos (CANHOLI, 2014).

Segundo Canholi (2014), os custos de investimento referem-se à implantação da obra e retratam os gastos necessários para os estudos, projetos, levantamentos, construção, desapropriações e indenizações. Os custos de operação e manutenção descrevem os gastos referentes à mão de obra, aos equipamentos, aos combustíveis, aos custos relativos à execução dos reparos, às limpezas, às inspeções e às revisões necessárias durante a vida útil da estrutura. O custo de riscos descreve os valores que correspondem aos danos não evitados já que as obras de drenagem atendem a diferentes períodos de retorno da precipitação de projeto.

3 METODOLOGIA

Este trabalho buscou representar o escoamento no canal do rio Piracicaba por meio de simulações hidráulicas realizadas a partir do *software* HEC-RAS. A metodologia serviu de base para o cálculo da linha d'água no trecho do rio pertencente ao município de Rio Piracicaba, mapeamento de áreas de risco de inundação na área urbana do município e sua análise de risco hidrodinâmico.

3.1 Área de Estudo

A área em estudo localiza-se no município de Rio Piracicaba, no estado de Minas Gerais, a aproximadamente 75 km da capital, Belo Horizonte. O município está posicionado em torno das coordenadas DATUM WGS 84 UTM E:692000 N:7796000.

O município de Rio Piracicaba apresenta uma população de 14.149 habitantes (IBGE, 2010) e sua economia é principalmente voltada para a extração de minério de ferro, agricultura de subsistência e pecuária leiteira. A Figura 4 apresenta a localização da cidade, elaborada com as imagens tratadas do satélite CBERS4A-WPM, fornecidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), do ano de 2021.

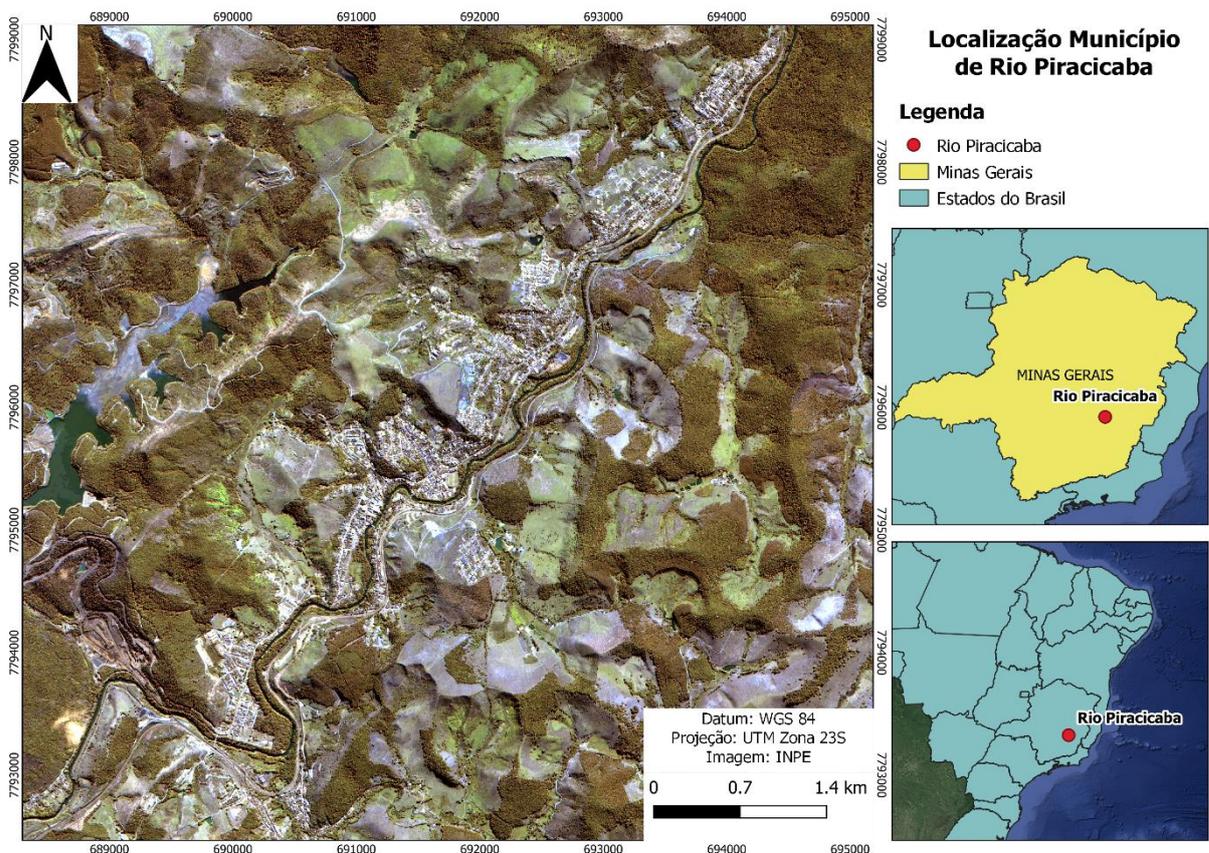


Figura 4 – Localização da área de estudo (AUTOR, 2022).

3.1.1 Hidrografia da Área

O rio Piracicaba pertence à bacia do rio Piracicaba (em âmbito estadual) e à bacia do rio Doce (em âmbito federal). A Figura 5 apresenta a Base Hidrográfica Ottocodificada (BHO) disponibilizada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), bem como as imagens tratadas do satélite CBERS4A-WPM, obtidas a partir do INPE, do ano de 2021.

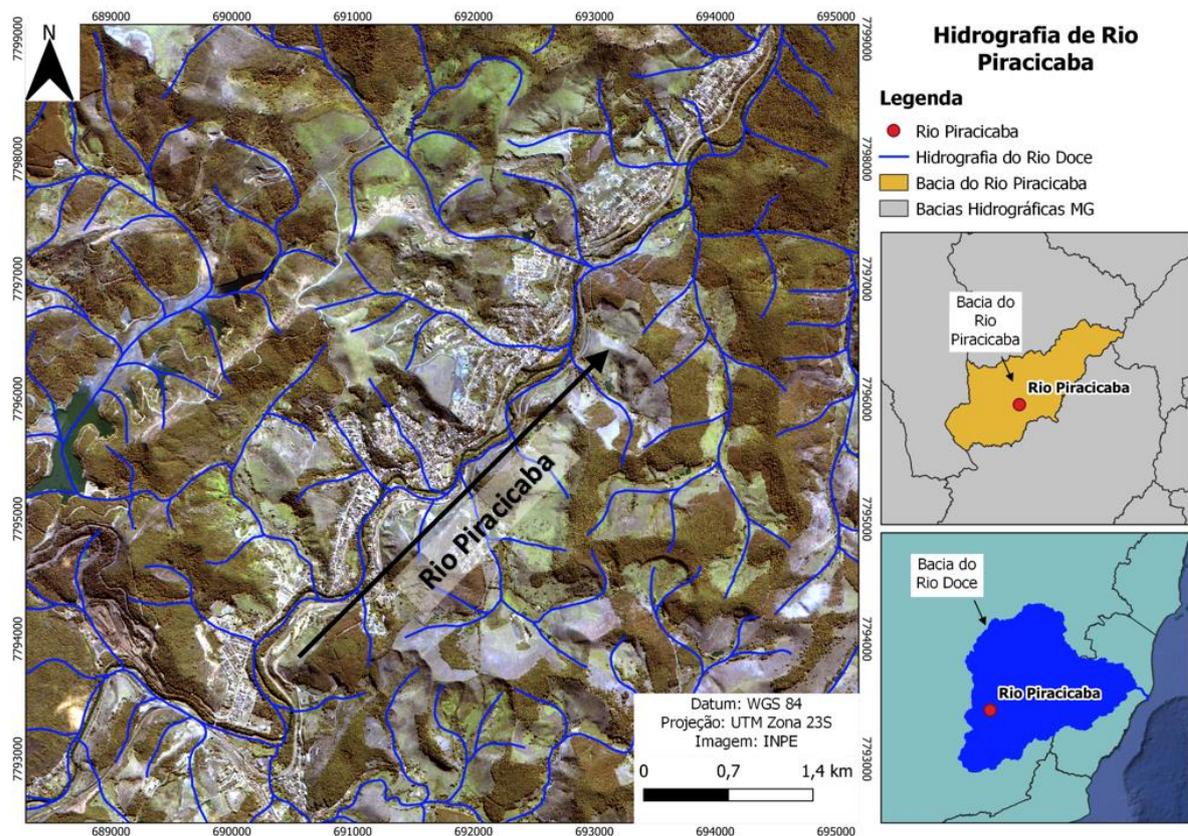


Figura 5 – Hidrografia da área de estudo (AUTOR, 2022).

3.1.2 Climatologia da Área

Para o desenvolvimento deste trabalho foi realizada a caracterização climática geral da área. Dentre as estações climatológicas com dados disponibilizados para o período de 1981 a 2010, pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), escolheu-se a estação João Monlevade (83591), localizada nas coordenadas: latitude -19,82; longitude -43,14 e altitude 859,84 metros, por se tratar da mais próxima em relação à área de estudo, conforme representado na Figura 6 a seguir.

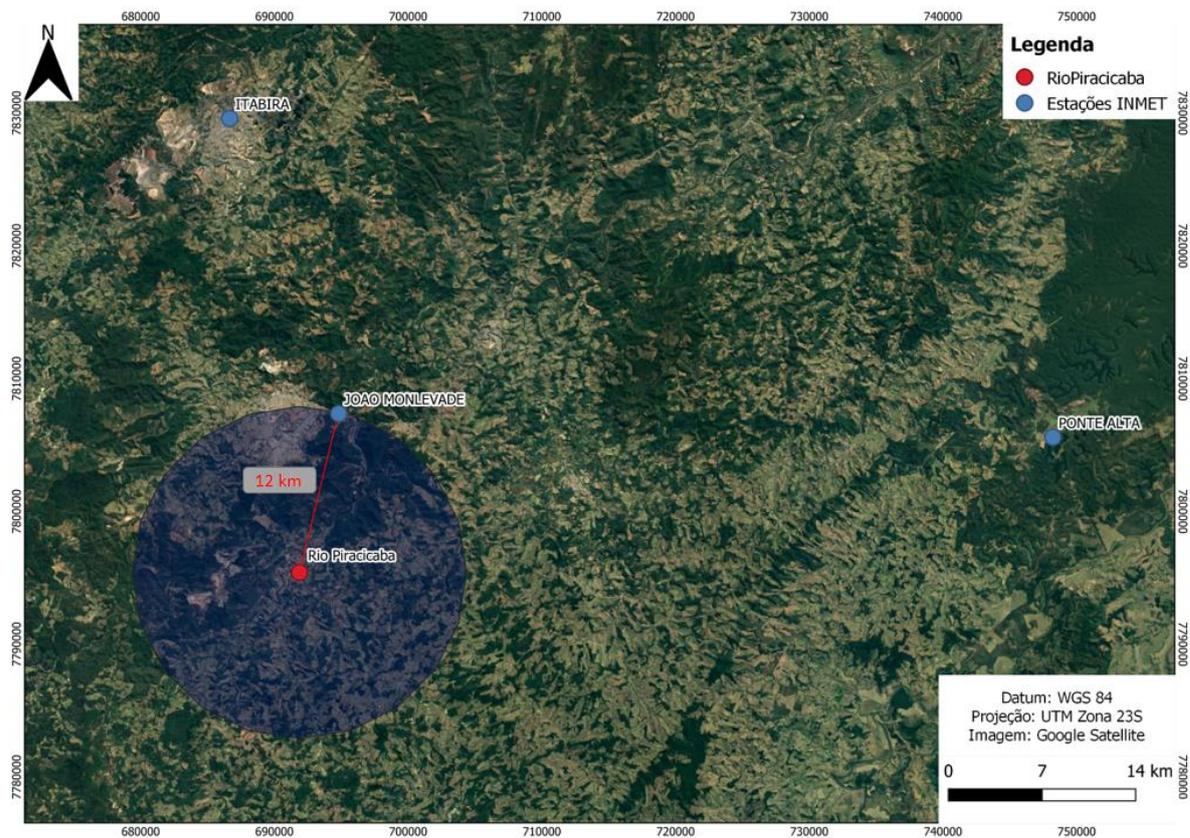


Figura 6 – Distância Rio Piracicaba e Estação 83591 (AUTOR, 2022).

A Tabela 1, apresenta os valores de temperatura máxima, média e mínima mensal, umidade relativa do ar e evaporação da região, para os anos de 1981 a 2010. E a seguir, das Figura 7 a 10, representaram-se, graficamente, os dados contidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Normais climatológicas da Estação 83591 (AUTOR, 2022).

Dados Estação 83591- João Monlevade						
Mês	Temperatura (°C)			Umidade Relativa do Ar (%)	Precipitação (mm)	Evaporação (mm)
	Máxima	Média	Mínima			
Janeiro	28,5	23,1	19,1	78,9	232,8	57,9
Fevereiro	29,3	23,4	19,2	76,0	125,9	61,0
Março	28,2	22,6	18,8	79,5	193,1	54,7
Abril	26,9	21,3	17,4	78,8	68,5	48,7
Maio	25,2	19,4	15,3	78,6	29,2	48,5
Junho	24,0	17,9	13,8	77,2	14,1	51,4

continua

Continuação da Tabela 1

Dados Estação 83591- João Monlevade						
Mês	Temperatura (°C)			Umidade Relativa do Ar (%)	Precipitação (mm)	Evaporação (mm)
	Máxima	Média	Mínima			
Julho	24,1	17,7	13,4	73,8	6,3	63,9
Agosto	24,9	18,4	14,0	72,1	13,7	73,4
Setembro	25,9	19,7	15,5	73,0	43,0	72,4
Outubro	27,1	21,1	17,0	74,9	97,8	69,8
Novembro	27,0	21,7	17,9	78,9	250,2	54,7
Dezembro	27,2	22,1	18,5	81,5	326,7	48,7

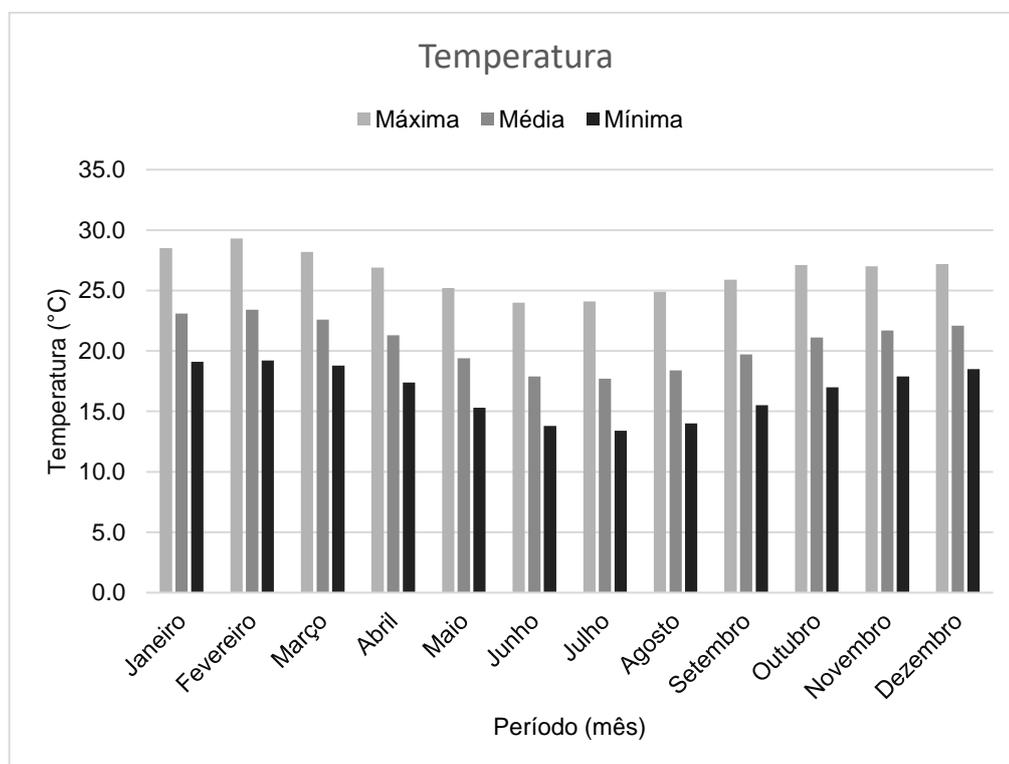


Figura 7 – Temperaturas médias da Estação 83591 (AUTOR, 2022).

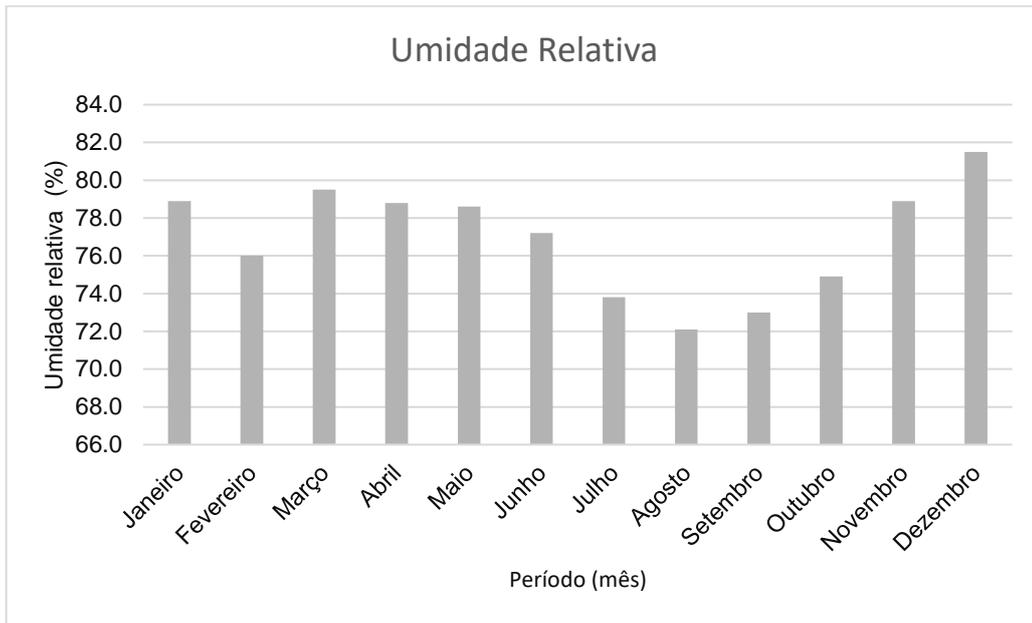


Figura 8 – Umidade relativa média da Estação 83591 (AUTOR, 2022).

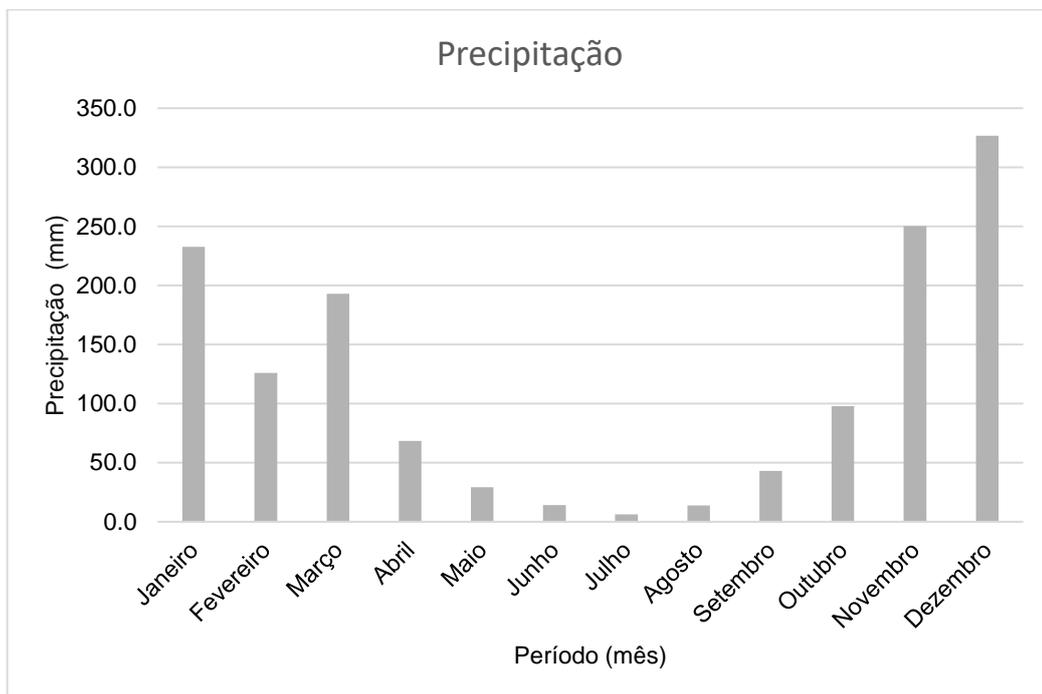


Figura 9 – Precipitação média da Estação 83591 (AUTOR, 2022).

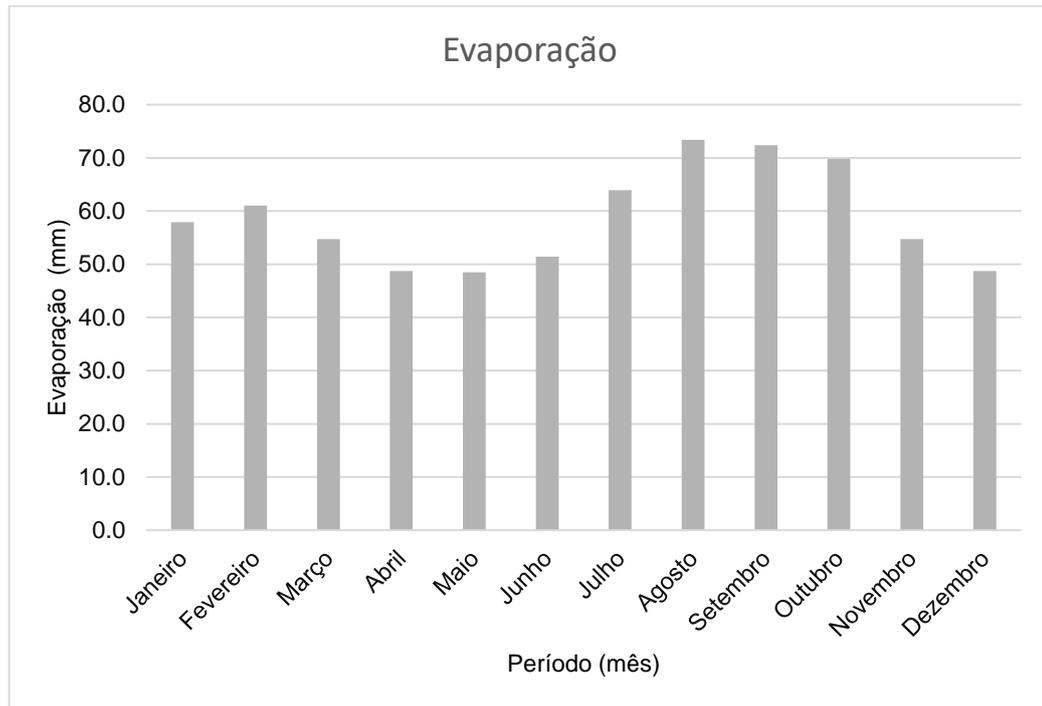


Figura 10 – Evaporação média da Estação 83591 (AUTOR, 2022).

3.2 Modelo Digital de Elevação (MDE)

Para o desenvolvimento do modelo hidráulico é necessária a inserção de um modelo de terreno que represente de forma adequada os dados observados em campo. Neste sentido, para elaboração do presente trabalho, foi considerado o modelo digital de elevações (MDE) do município de Rio Piracicaba, disponibilizado no catálogo de metadados da ANA (2014). A agência disponibiliza os dados gerados a partir das imagens estereopares de alta resolução espacial (0,5m) do satélite WorldView-2, os dados foram elaborados a partir dos mosaicos de imagens de alta resolução, que foram ortorretificados com o MDE, o MDE de superfície com precisão de 1m na planialtimetria (método de estereoscopia associado a pontos de controle levantados em campo). A Figura 11 apresenta o MDE considerado para o estudo e a Figura 12 o mapa de elevações gerado a partir modelo.

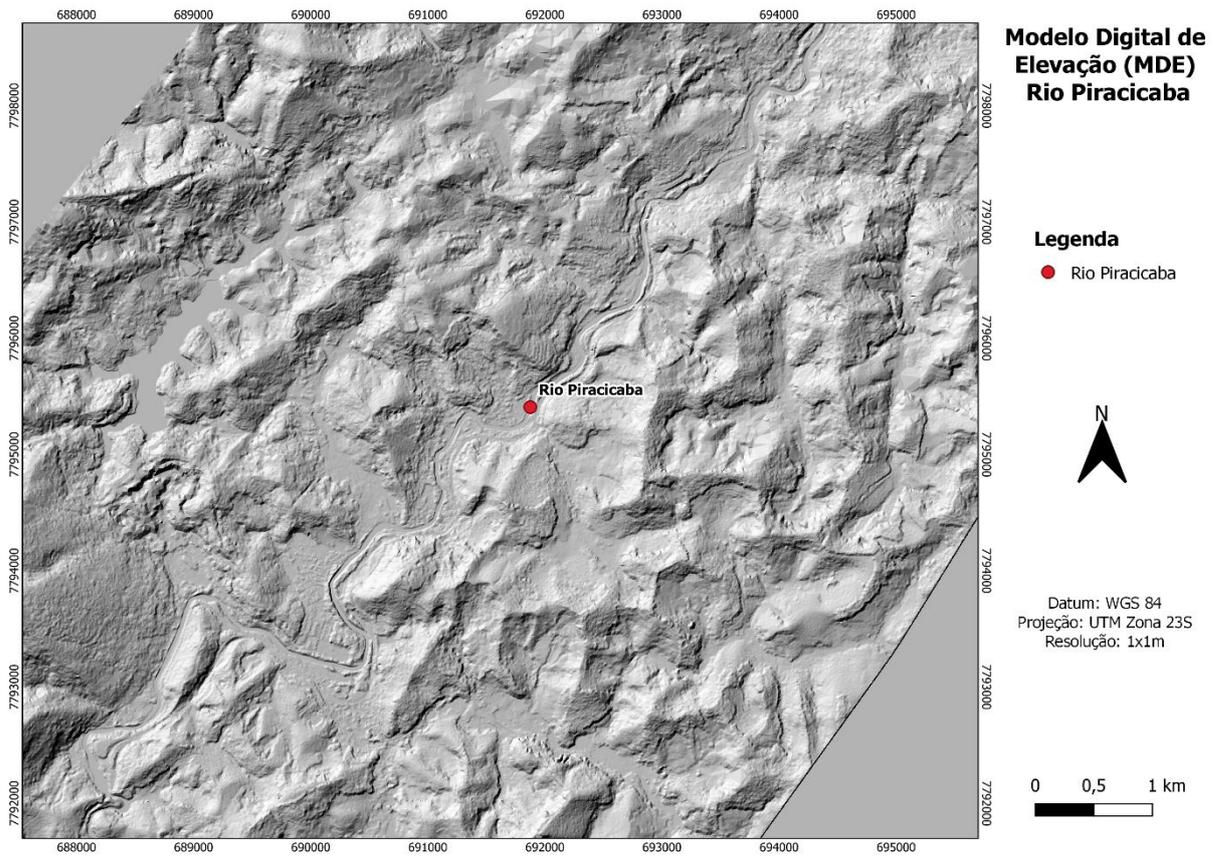


Figura 11 – Modelo Digital de Elevação da área de estudo (AUTOR, 2022).

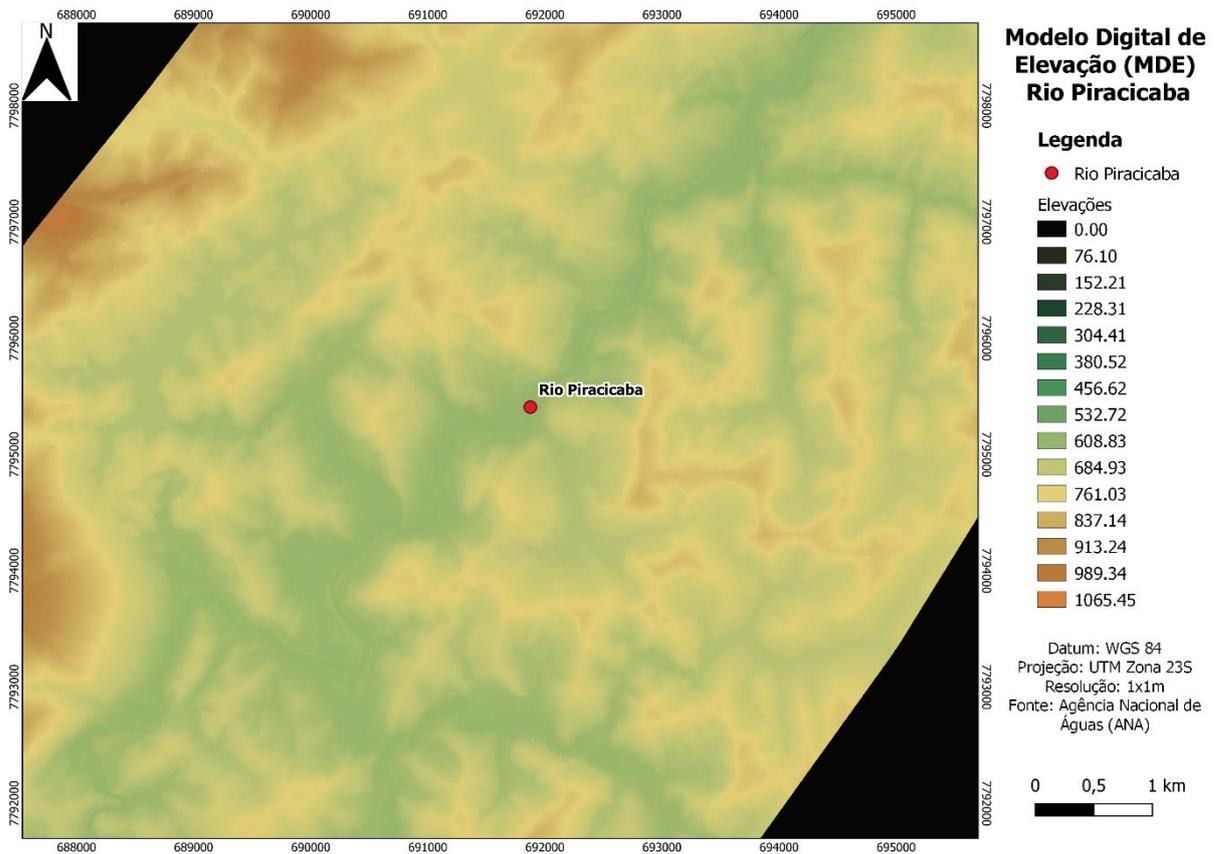


Figura 12 – Mapa de elevações da área de estudo (AUTOR, 2022).

3.3 Malha

A malha define a região onde ocorre o escoamento no modelo. Para o presente estudo foi adotado o tamanho de 15x15 metros para as células nas regiões fora do curso d'água, já para a região de curso d'água (calha fluvial) foi realizado o refinamento da malha pela função “breakline”, utilizando espaçamento de 5 metros para as células. A Figura 13 apresenta a região da malha adotada.

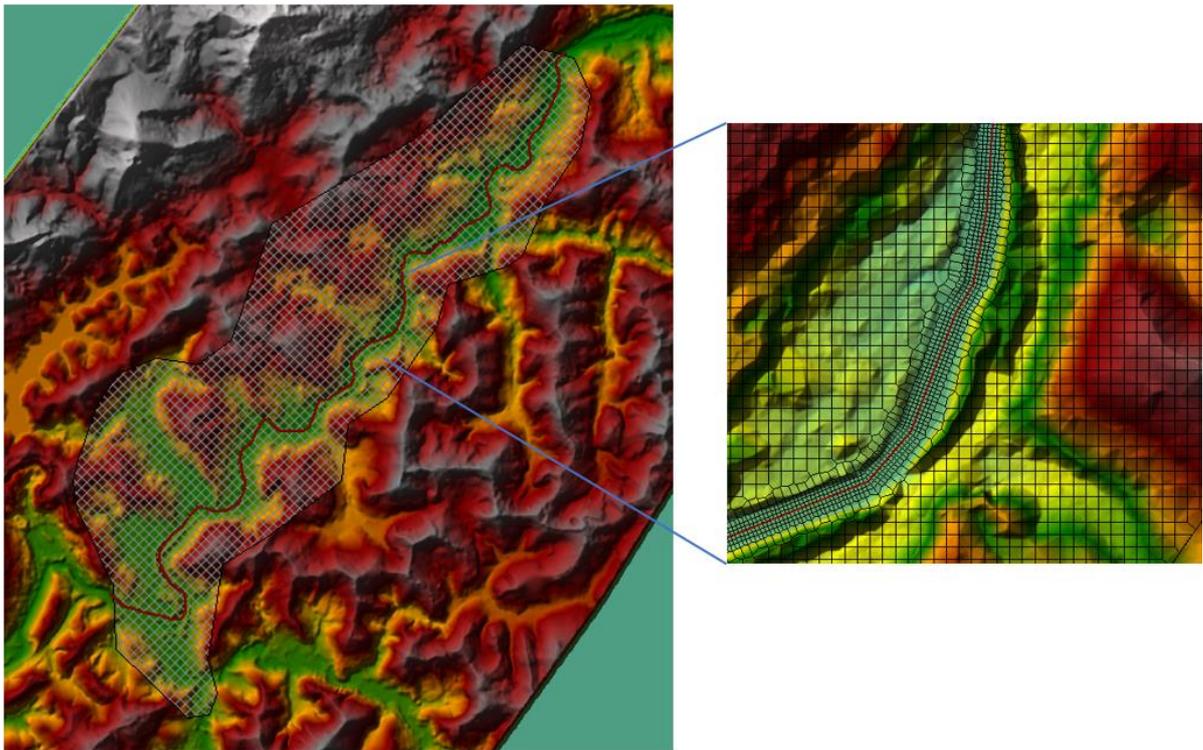


Figura 13 – Região da malha adotada (AUTOR, 2022).

3.4 Coeficiente de Manning

O coeficiente de Manning é um parâmetro que define a rugosidade das superfícies onde acontece o fluxo, deste modo, refletindo as perdas de carga no escoamento.

Uma vez que a espacialização da mancha de inundação pode atingir regiões fora da calha do rio, para obtenção de uma simulação mais representativa do visto em campo, além da definição do Manning para o leito, também é necessária a inserção do coeficiente dos locais de entorno da calha. Desta forma, para calibragem do modelo hidráulico no HEC-RAS utilizou-se o arquivo Uso e Ocupação do Solo em moderada resolução espacial (10m) da bacia do Rio Doce, disponibilizado pela ANA (2016) em seu catálogo de metadados. A classificação foi realizada por meio das imagens dos satélites ALOS, QUICKBIRD, WORLD VIEW I e LANDSAT-7 e apresenta uma escala

de interpretação de 10 metros. A Figura 14 apresenta a classificação para a área de interesse.



Figura 14 – Uso e Ocupação do Solo Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).

A partir da classificação de uso do solo para a região foram atribuídos valores de coeficiente de Manning para cada classe observada, de acordo com os recomendados por Baptista e Lara (2014) e Chow (1959). A Tabela 2 apresenta os valores adotados para calibragem do modelo.

Tabela 2 – Valores de Manning adotados (AUTOR, 2022).

Uso e ocupação do solo	Coefficiente de Rugosidade de Manning
Áreas de Mineração	0,023
Áreas Urbanas	0,100
Corpos Hídricos	0,040
Pastagem	0,030
Vegetação nativa	0,070

3.5 Vazões e Condições de Contorno

As vazões máximas, para inserção como condição de contorno de montante no modelo hidráulico, partiram do registro de vazões históricas observadas na estação fluviométrica Rio Piracicaba (56610000), gerida pela ANA/CPRM, localizada nas coordenadas: latitude -19,93; longitude -43,17 e presente no trecho do rio que se localiza no município.

Os registros de vazões na estação são apresentados em forma de dados mensais. Logo, para o desenvolvimento deste trabalho foi feita a classificação das maiores vazões observadas em cada ano de leitura, compreendidos entre 1926 e 2021. Desta forma, a Tabela 3 consolida as vazões máximas anuais obtidas.

Tabela 3 – Vazões máximas anuais estação 56610000 (ANA, 2022).

Ano	Vazão (m³/s)						
1926	301,37	1950	175,79	1974	117,03	1998	160,07
1927	166,56	1951	245,80	1975	97,87	1999	125,30
1928	48,42	1952	265,29	1976	133,32	2000	204,59
1929	131,66	1953	135,84	1977	215,67	2001	139,39
1930	313,02	1954	84,24	1978	176,72	2002	234,48
1931	245,80	1955	262,00	1979	180,48	2003	192,26
1932	180,48	1956	235,24	1980	246,87	2004	207,09
1933	281,97	1957	148,70	1981	160,22	2005	234,48
1934	194,84	1958	155,75	1982	373,86	2006	125,99
1935	129,17	1959	109,20	1983	203,66	2007	133,69
1936	125,07	1960	230,02	1984	251,16	2008	197,15
1937	253,31	1961	313,02	1985	240,50	2009	315,37
1938	126,71	1962	178,60	1986	211,64	2010	99,50
1939	211,64	1963	87,21	1987	162,92	2011	327,23
1940	135,84	1964	147,83	1988	65,03	2012	330,82
1941	148,70	1965	152,21	1989	291,04	2013	135,11
1942	199,72	1966	225,88	1990	37,76	2014	81,23
1943	276,37	1967	86,14	1991	338,05	2015	59,41
1944	190,00	1968	114,66	1992	335,63	2016	211,17
1945	313,02	1969	140,93	1993	71,43	2017	89,60
1946	162,02	1970	106,90	1994	176,72	2018	181,35
1947	373,86	1971	165,65	1995	277,48	2019	53,97
1948	515,22	1972	193,87	1996	146,65	2020	167,89
1949	279,73	1973	277,48	1997	498,16	2021	171,05

Destaca-se, ainda, que a condição adotada para jusante do modelo foi a opção de profundidade normal (*normal depth*). Assim, para *input* do *software* foi adotada a declividade média obtida para o trecho final da calha simulada, com o valor de 0,0003 m/m.

Por fim, após uma análise de sensibilidade do modelo, visando obter o tempo em que fluxo se tornasse constante, foi adotada a duração para simulação do evento igual a 6 horas e intervalo de computação dos dados de 1 segundo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, dos itens 4.1 a 4.4 são apresentados os resultados obtidos pela análise de frequência e a modelagem hidráulica, enquanto o item 4.5 discute seus efeitos e causas.

4.1 Análise de Frequência - Vazões

Considerando as vazões históricas da bacia, apresentadas no item 3.5, tem-se que:

- Tamanho da amostra: 96 unidades;
- Valor máximo: 515,22 m³/s;
- Valor mínimo: 37,76 m³/s;
- Média: 195,11 m³/s;
- Desvio padrão: 90,43 m³/s e
- Assimetria: 0,94.

A determinação da cheia de projeto foi realizada pelo método direto, que parte da associação das vazões e seu referente TR. O cálculo do tempo de retorno é realizado pelo inverso da probabilidade para valor de vazão máxima anual ser igualado ou excedido em um ano qualquer. Deste forma, o cálculo foi realizado a partir do aplicativo SEAF – Sistema Especialista de Análise de Frequência (CÂNDIDO, 2003), disponibilizado no site do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG. A Tabela 4 resume os resultados obtidos.

Tabela 4 – Vazões obtidas pelo SEAF (AUTOR, 2022).

Distribuição	Tempo de Retorno (anos)						
	2	5	10	50	100	200	1.000
Normal	195,11	269,27	308,04	376,08	400,10	422,08	467,41
Log Normal	174,47	263,59	327,04	477,57	545,86	616,88	793,84
Gumbel	180,00	261,29	315,11	433,57	483,65	533,54	649,12
Exponencial	164,60	255,71	324,63	484,65	553,57	622,49	782,51
Pearson-III	182,01	264,72	315,95	419,91	461,03	500,73	588,93
Log Pearson-III	183,23	266,86	316,44	409,80	443,76	474,89	538,29
GEV	182,05	263,22	315,00	423,73	467,61	510,15	604,35
GPA	179,84	276,77	325,88	391,85	407,61	418,80	433,83

Para o desenvolvimento do modelo foram adotados os valores para série Generalizada de Valores Extremos (GEV), por ser a de melhor desempenho nos testes de ajuste. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos para os testes de ajuste das séries.

Tabela 5 – Testes de Ajuste das Séries (AUTOR, 2022).

Distribuição	Teste de Ajuste		
	Teste de Filliben		Teste da Variância
	R (90%)	R	Z
Normal	0,9886	0,9739	3,1557
Log Normal	0,9886	0,9881	2,1243
Gumbel	0,9813	0,9951	0,4839
Exponencial	0,9762	0,9716	3,5681
Pearson-III	0,9894	0,9944	0,3944
Log Pearson-III	0,9903	0,9969	0,8572
GEV	0,9887	0,9950	0,0824
GPA	0,9936	0,9800	3,2154

A GEV apresentou, frente ao teste da variância, menor valor de | Z | (0,0824), quando comparada as demais séries. Para o teste de Filliben a série apresentou um valor de R = 0,9950 e seu respectivo intervalo unilateral a 90% de confiança R (90%) = 0,9887, satisfazendo a condição R > R (90%).

A partir da metodologia e dados apresentados anteriormente, foi possível realizar a modelagem hidráulica de sete cenários de escoamento (Tabela 6), considerando o conjunto de vazões associadas aos tempos de retorno (TR) de 2 a 1.000 anos.

Tabela 6 – Cenários Modelo Hidráulico (AUTOR, 2022).

Cenário	Vazão (m³/s)
1 (TR 2 anos)	182,05
2 (TR 5 anos)	263,22
3 (TR 10 anos)	315,00
4 (TR 50 anos)	423,73
5 (TR 100 anos)	467,61
6 (TR 200 anos)	510,15
7 (TR 1.000 anos)	604,35

4.2 Modelo Hidráulico

A Figura 15 apresenta o eixo selecionado e a Figura 16 o perfil longitudinal do trecho considerado para modelagem.

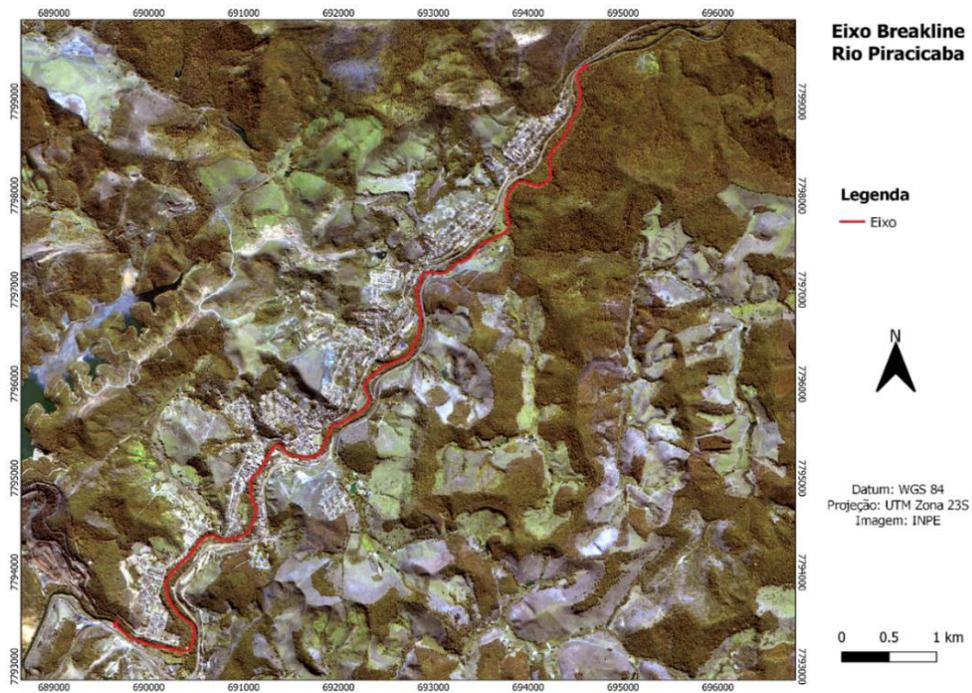


Figura 15 – Eixo “Breakline” - Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).

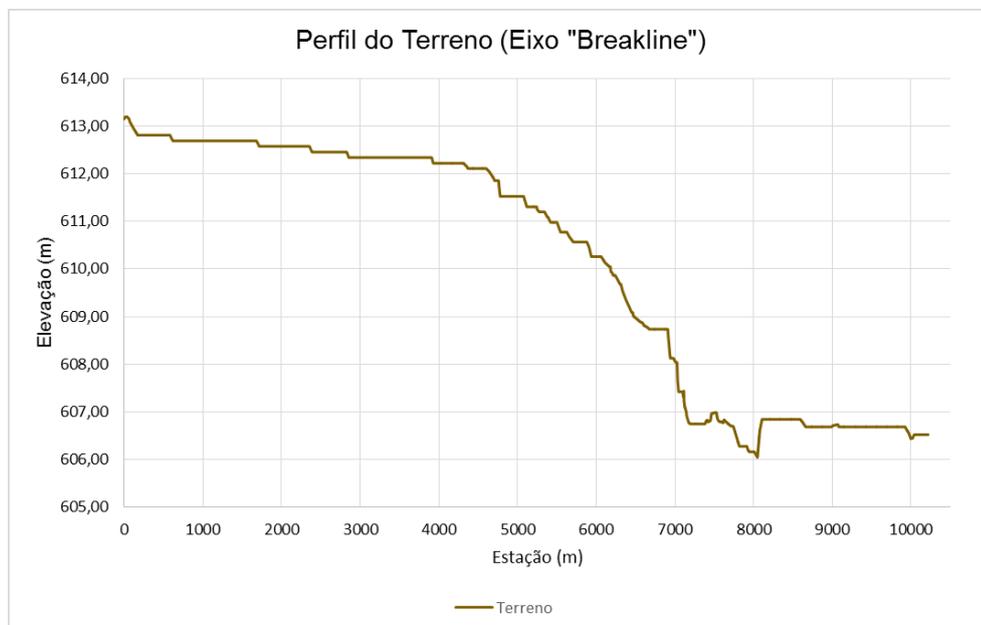


Figura 16 – Perfil Terreno (Eixo “Breakline”) - Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).

A Figura 17 retrata os resultados obtidos para a elevação da linha d'água, considerando os diversos tempos de retorno aplicados para modelagem do escoamento no canal.

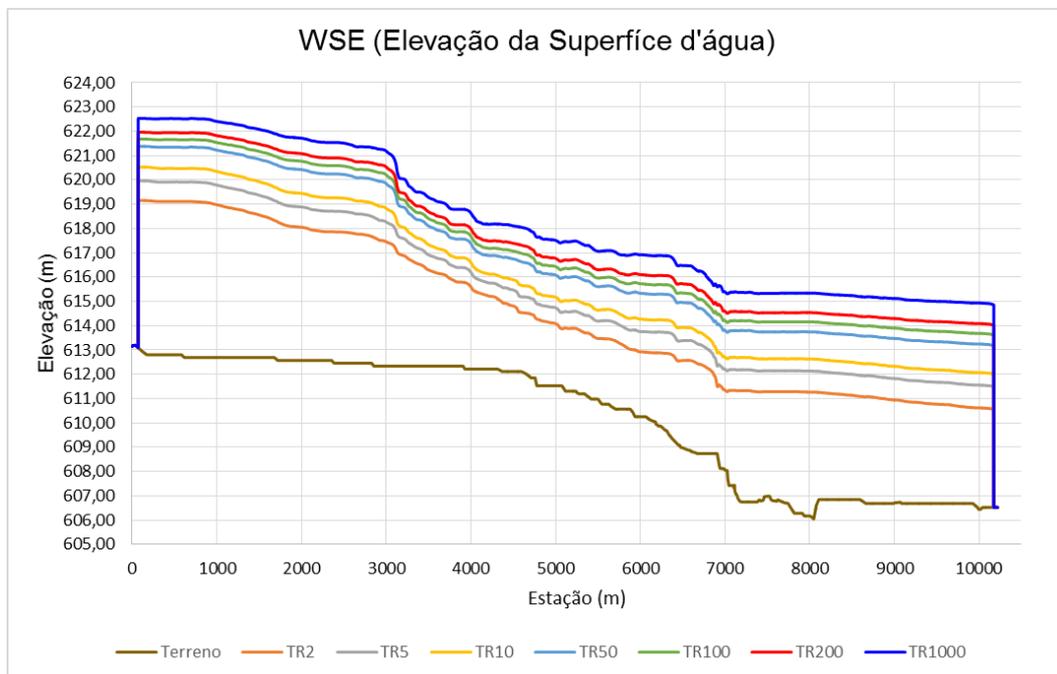


Figura 17 – Resultados WSE (Elevação da Superfície d'água) (AUTOR, 2022).

A partir do gráfico (Figura 17) é possível observar que os resultados são condizentes com os esperados, sendo observado um aumento da elevação da superfície de lâmina d'água em função do aumento do tempo de retorno e conseqüentemente o aumento da vazão modelada. Sendo que, quando se considera o final do escoamento como ponto de controle, observa-se para o TR de 2 anos uma lâmina de, aproximadamente, 4 metros, e para o TR de 1.000 anos de, aproximadamente, 8 metros.

A Figura 18 apresenta os resultados obtidos para a velocidade do escoamento ao longo do trecho modelado, considerando os diversos tempos de retorno do estudo.

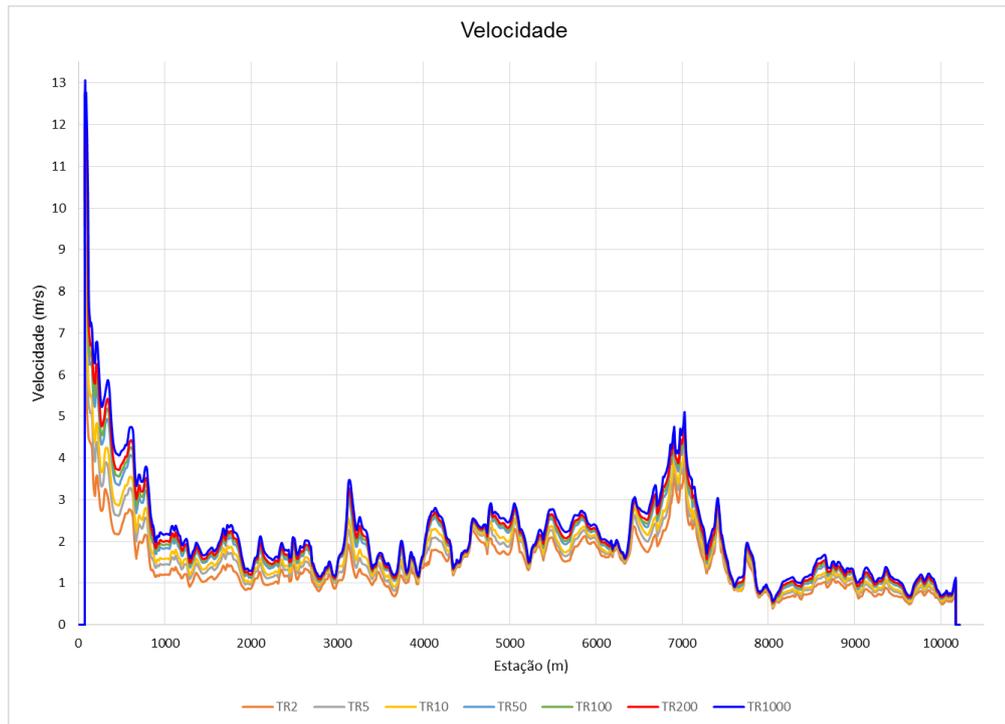


Figura 18 – Resultados velocidades do escoamento – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).

Quando se observa o perfil de velocidades é possível concluir que a velocidade média se encontra próxima de 1,8m/s para o TR de 2 anos e de 2,1m/s para o TR de 1.000 anos, condizente para escoamentos desta natureza. Sendo que, nas regiões de maior declividade do terreno, conseqüentemente, são observadas maiores velocidades de escoamento.

São observadas duas regiões de picos expressivos no gráfico (Figura 18), o primeiro deles no início do escoamento, não correspondendo às declividades observadas no perfil do terreno, o que caracteriza uma instabilidade da modelagem na região, possivelmente causada pela proximidade com a condição de contorno de montante e pela topografia, que apresenta um vale mais encaixado nesta porção. Já o segundo ponto de pico das velocidades é observado próximo à estação 7.000 metros, condizente com o esperado para simulação, pelo fato da estação estar no trecho de maior declividade na região, conforme observado na Figura 16.

A Figura 19 apresenta os resultados obtidos para o número de Froude, considerando os diversos TRs do estudo.

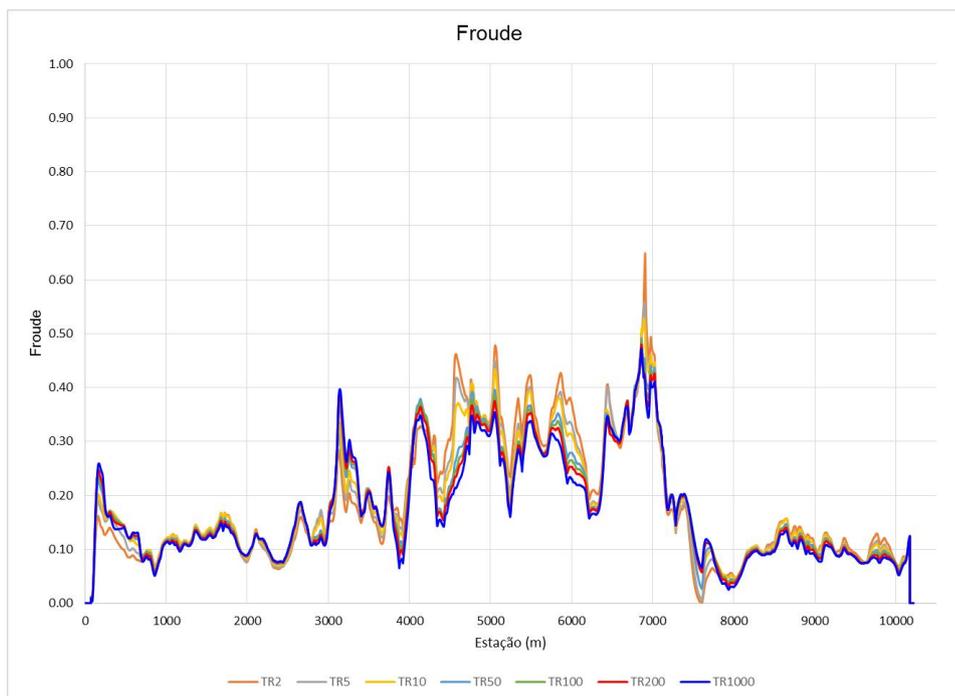


Figura 19 – Resultados número de Froude – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).

No que tange o número de Froude, o escoamento é classificado em sua totalidade como subcrítico (fluvial), correspondendo ao resultado esperado para o tipo de canal modelado pelo estudo, de leito natural e com baixas declividades ao longo do eixo. É possível observar o maior pico do gráfico, próximo à estação 7.000 metros, em consonância com o gráfico de velocidades e com a declividade mais acentuada para o trecho em que esta estação se encontra.

4.3 Mapeamento de Áreas Inundáveis

A partir do modelo hidráulico foram obtidas as áreas inundáveis do município pelas vazões geradas pelos eventos associados aos tempos de retornos de 2, 5, 10, 50, 100, 200 e 1.000 anos. Da Figura 20 a Figura 26 são apresentadas as manchas de inundação resultantes do estudo.

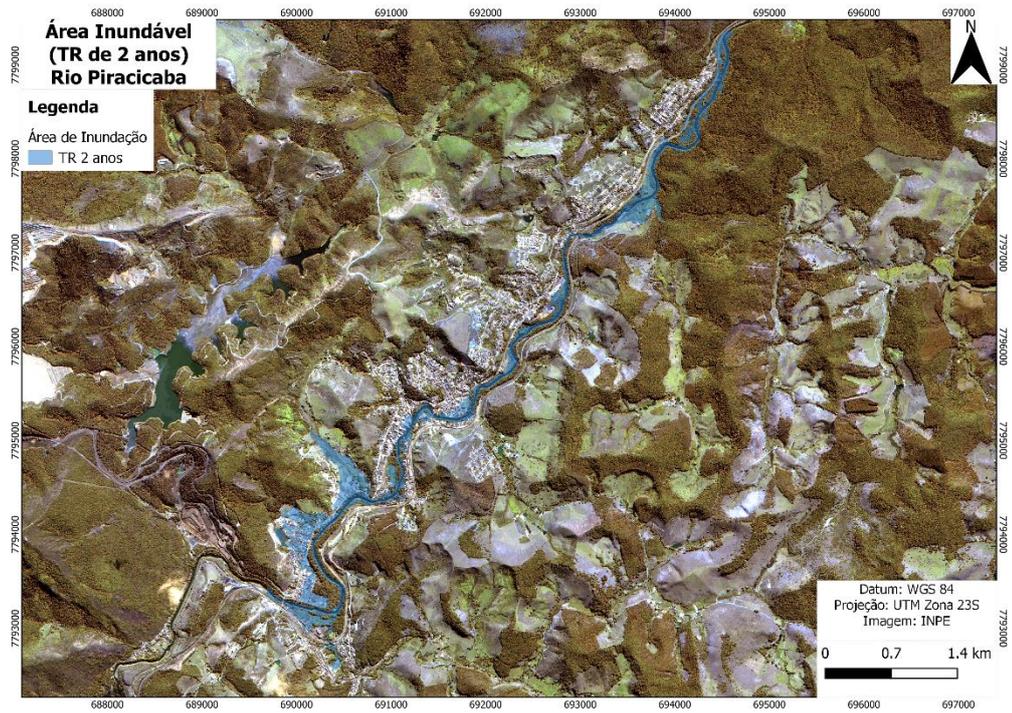


Figura 20 – Espacialização da Área Inundável – TR 2 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).

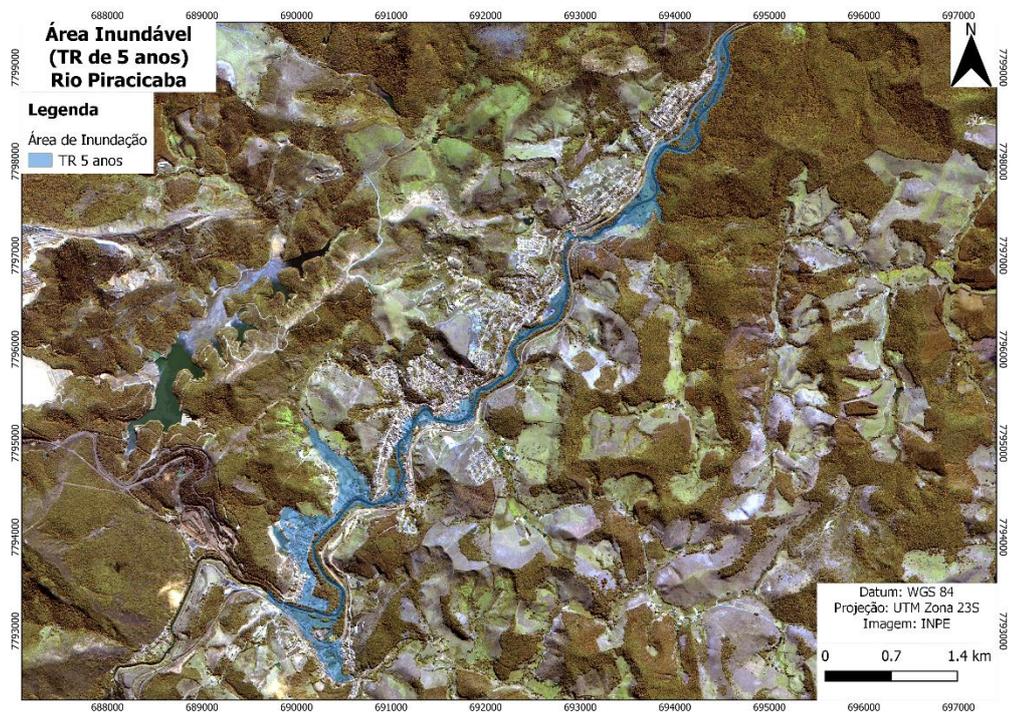


Figura 21 – Espacialização da Área Inundável – TR 5 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).

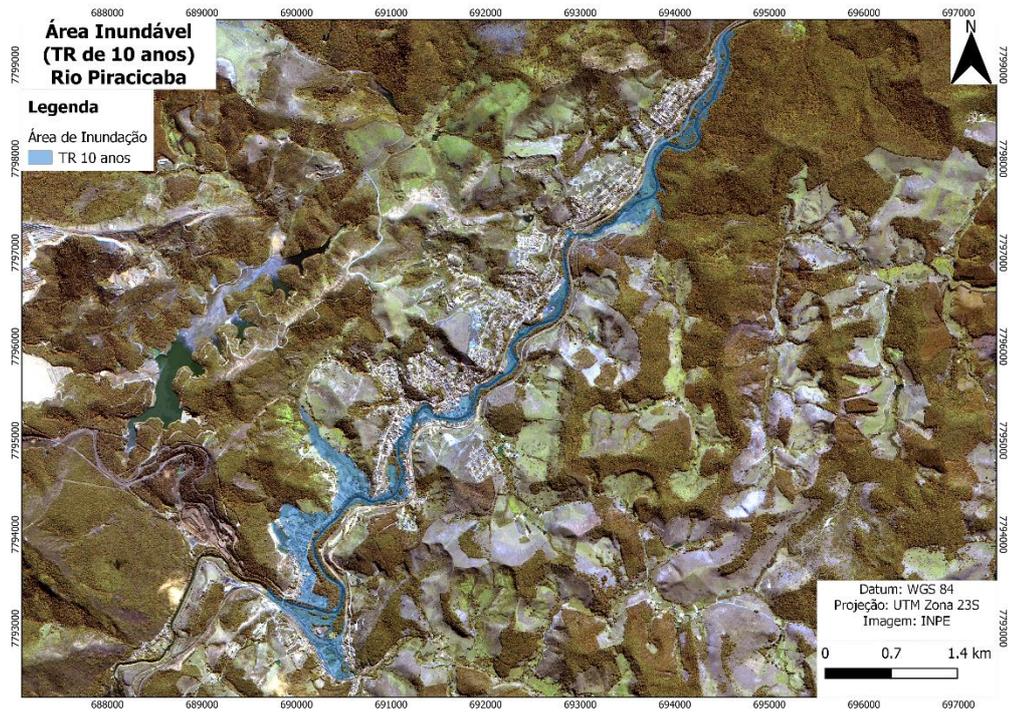


Figura 22 – Espacialização da Área Inundável – TR 10 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).

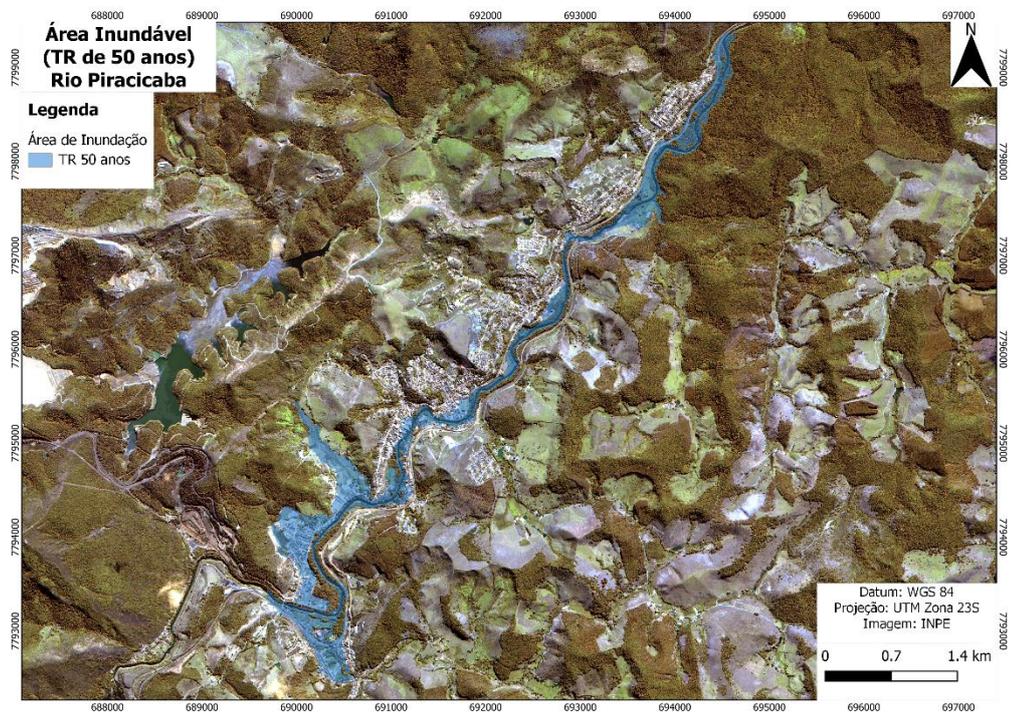


Figura 23 – Espacialização da Área Inundável – TR 50 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).

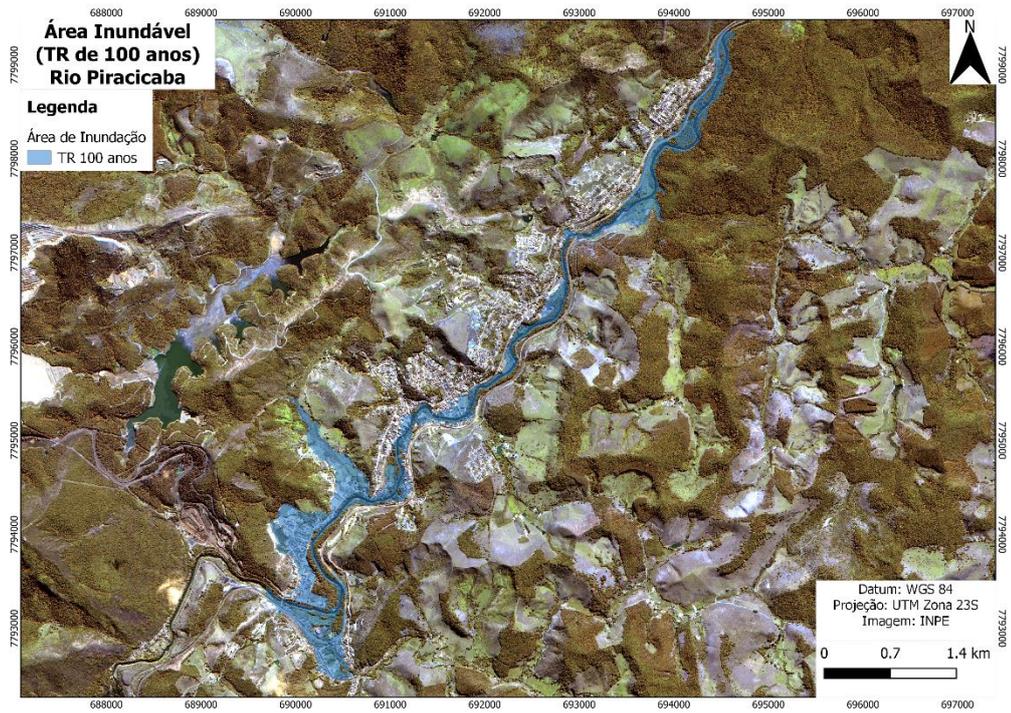


Figura 24 – Espacialização da Área Inundável – TR 100 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).

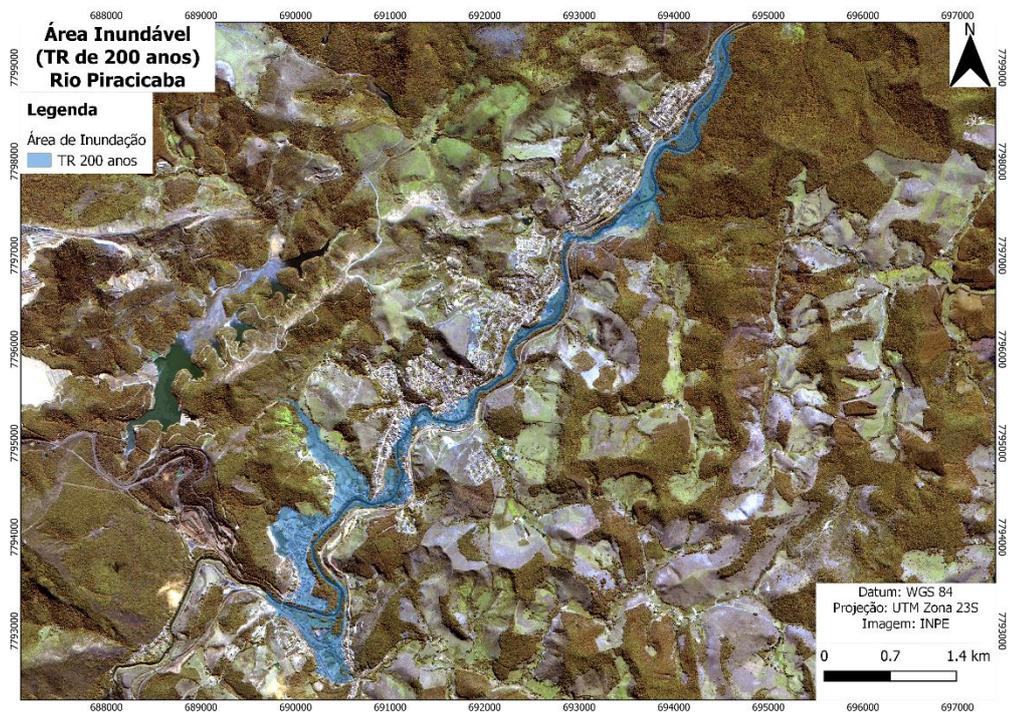


Figura 25 – Espacialização da Área Inundável – TR 200 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).

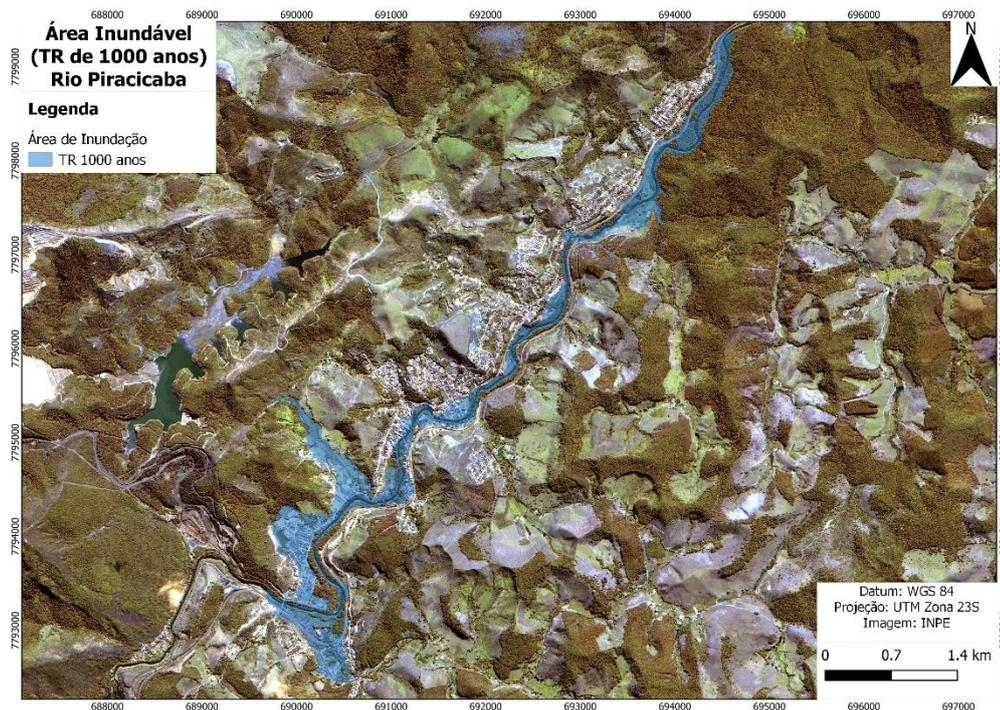


Figura 26 – Espacialização da Área Inundável – TR 1.000 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).

A Tabela 7 apresenta, em resumo, as áreas de abrangência das manchas de inundação obtidas para os cenários considerados pelo estudo.

Tabela 7 – Áreas das Manchas de Inundação (AUTOR, 2022).

Cenário	Área (m ²)	Área (km ²)
1 (TR 2 anos)	1.213.459,97	1,21
2 (TR 5 anos)	1.481.846,88	1,48
3 (TR 10 anos)	1.607.030,83	1,61
4 (TR 50 anos)	1.800.626,30	1,80
5 (TR 100 anos)	1.864.467,45	1,86
6 (TR 200 anos)	1.920.643,54	1,92
7 (TR 1.000 anos)	2.033.362,92	2,03

4.4 Risco Hidrodinâmico

A seguir, da Figura 27 à Figura 33 são apresentados os mapas de risco hidrodinâmico para os sete cenários considerados. Salienta-se que a classificação

quanto ao risco segue a nomenclatura sugerida por Smith, Davey e Cox (2014) e é apresentada na Tabela 8; a legenda de cores é apresentada na Tabela 9.

Tabela 8 – Classificação quanto ao Risco Hidrodinâmico (Adaptado de SMITH, DAVEY e COX, 2014).

Classificação	Descrição
H1	Geralmente seguro para veículos, pessoas ou edifícios.
H2	Inseguro para veículos pequenos.
H3	Inseguro para veículos, crianças e idosos.
H4	Inseguro para veículos e pessoas.
H5	Inseguro para veículos e pessoas. Todos os edifícios vulneráveis a danos estruturais. Alguns edifícios menos robustos sujeitos à falha.
H6	Inseguro para veículos e pessoas. Todos os tipos de edifícios considerados vulneráveis à falha.

Tabela 9 – Legenda Risco Hidrodinâmico (Adaptado de SMITH, DAVEY e COX, 2014).

Risco Hidrodinâmico				
Legenda	Risco	Classe	Profundidade Limite (m)	Velocidade (m/s)
	H1	$P \times V \leq 0,3$	0,30	2,00
	H2	$P \times V \leq 0,6$	0,50	2,00
	H3	$P \times V \leq 0,6$	1,20	2,00
	H4	$P \times V \leq 1,0$	2,00	2,00
	H5	$P \times V \leq 4,0$	4,00	4,00
	H6	$P \times V > 4,0$	-	-

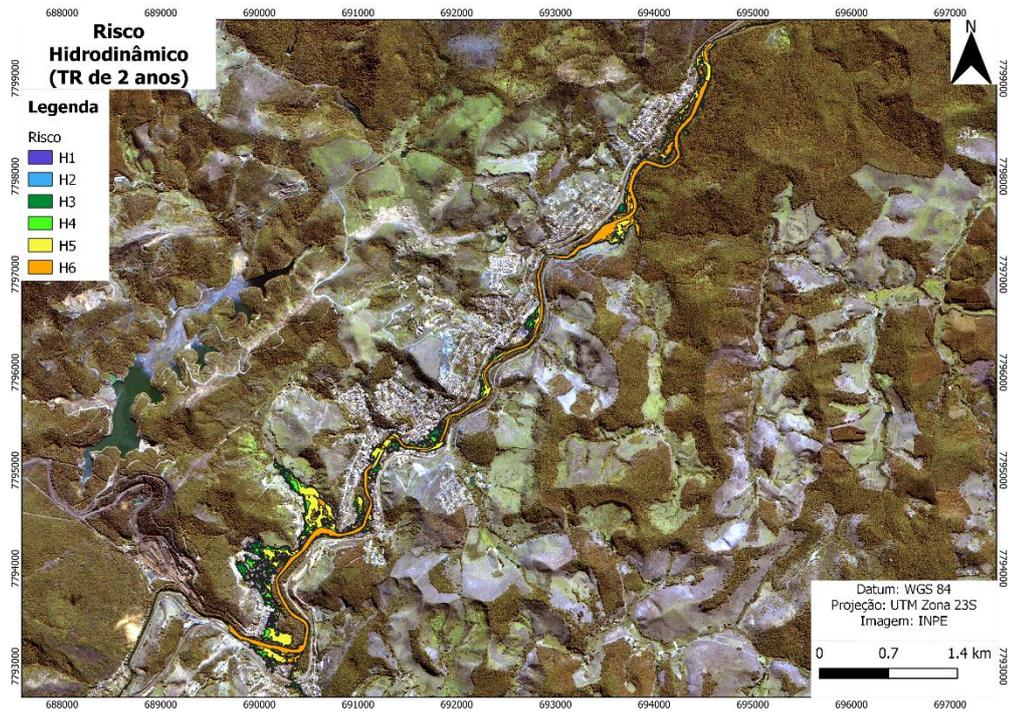


Figura 27 – Classificação Risco Hidrodinâmico – TR 2 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).

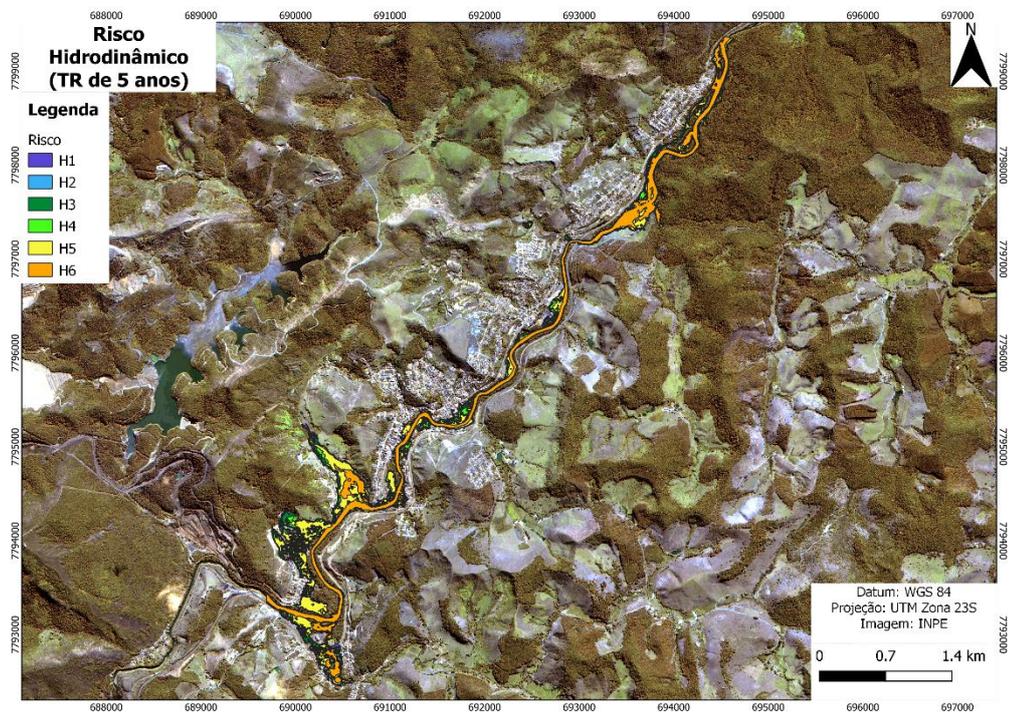


Figura 28 – Classificação Risco Hidrodinâmico – TR 5 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).

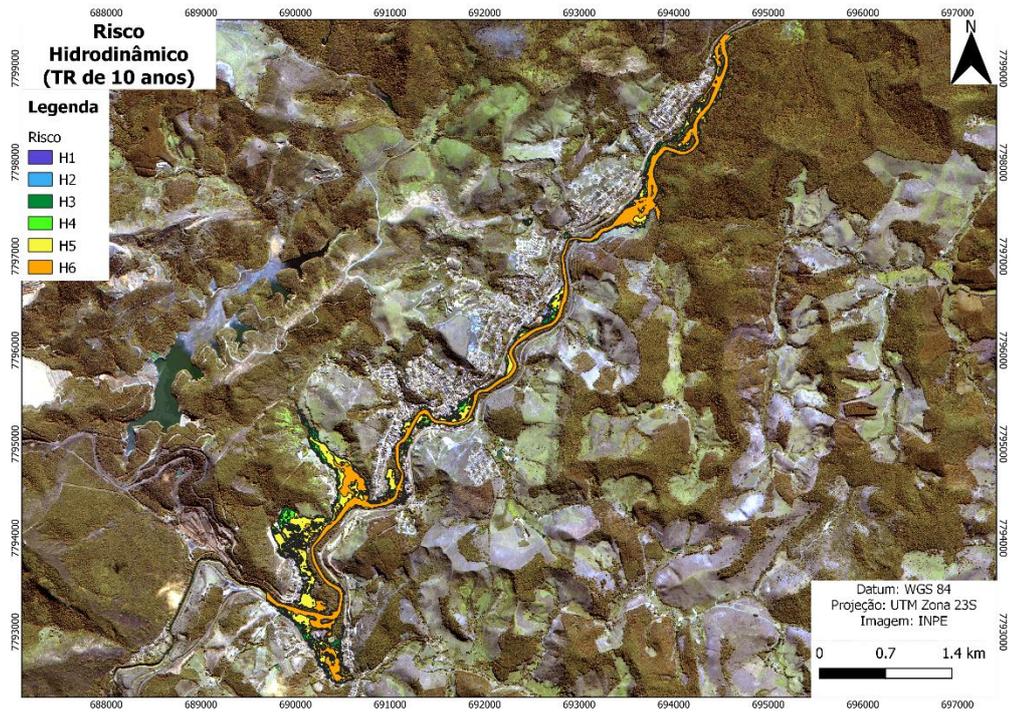


Figura 29 – Classificação Risco Hidrodinâmico – TR 10 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).

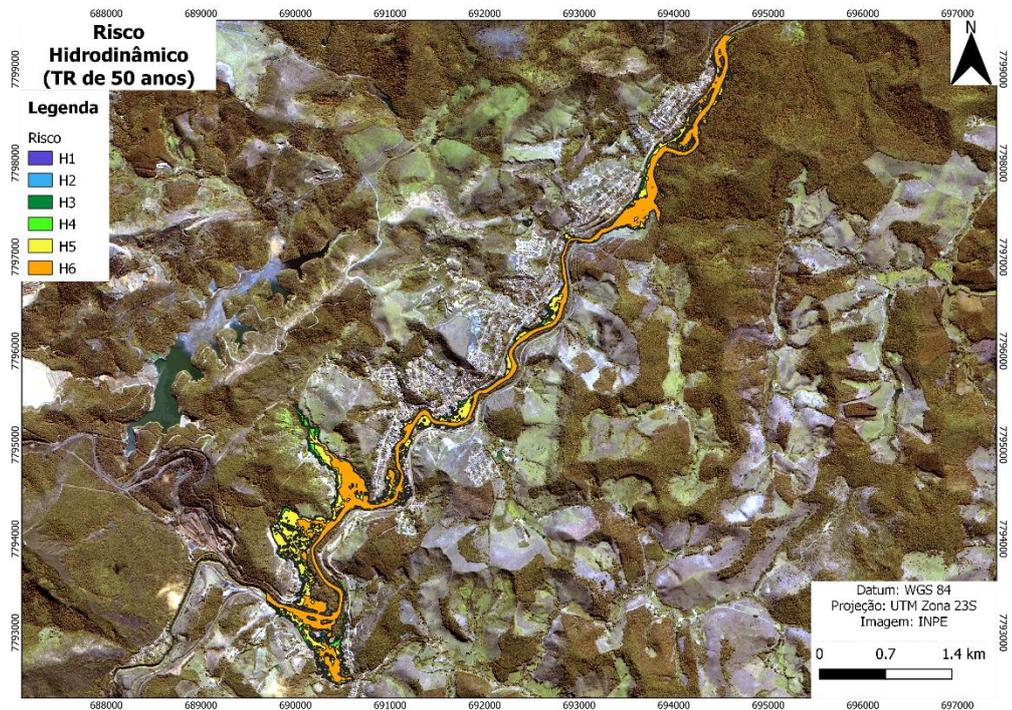


Figura 30 – Classificação Risco Hidrodinâmico – TR 50 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).

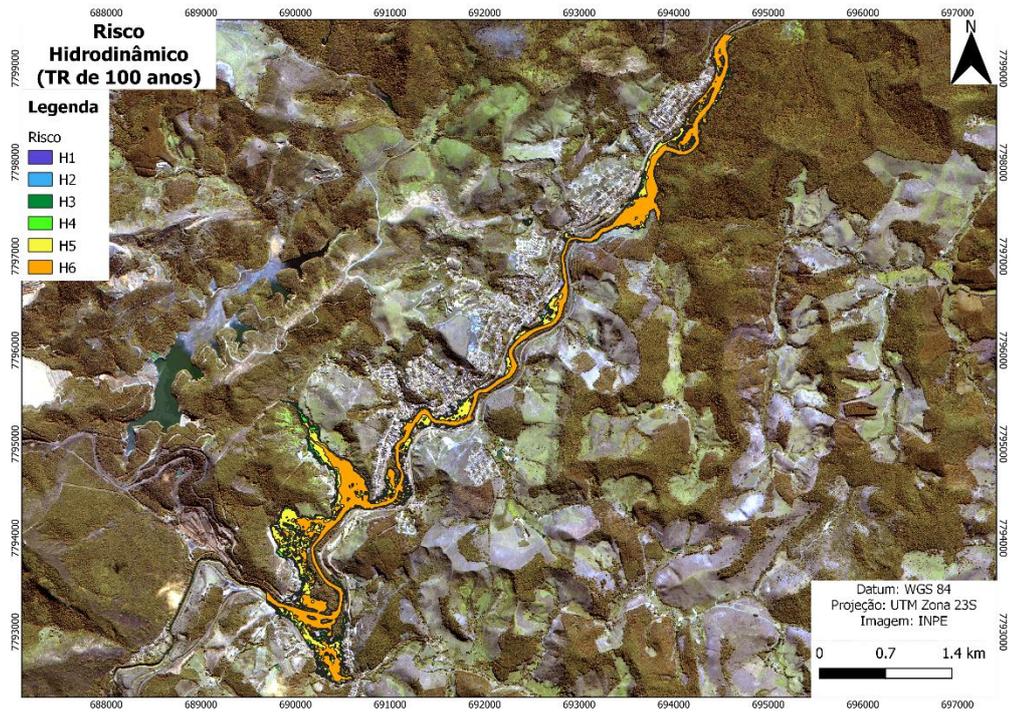


Figura 31 – Classificação Risco Hidrodinâmico – TR 100 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).

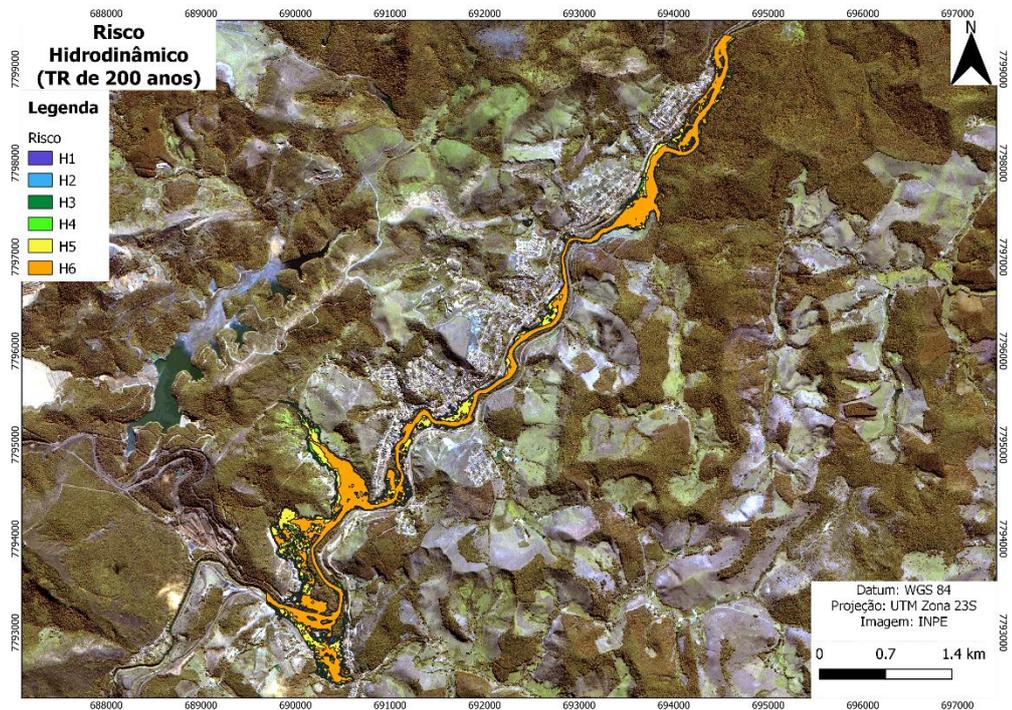


Figura 32 – Classificação Risco Hidrodinâmico – TR 200 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).

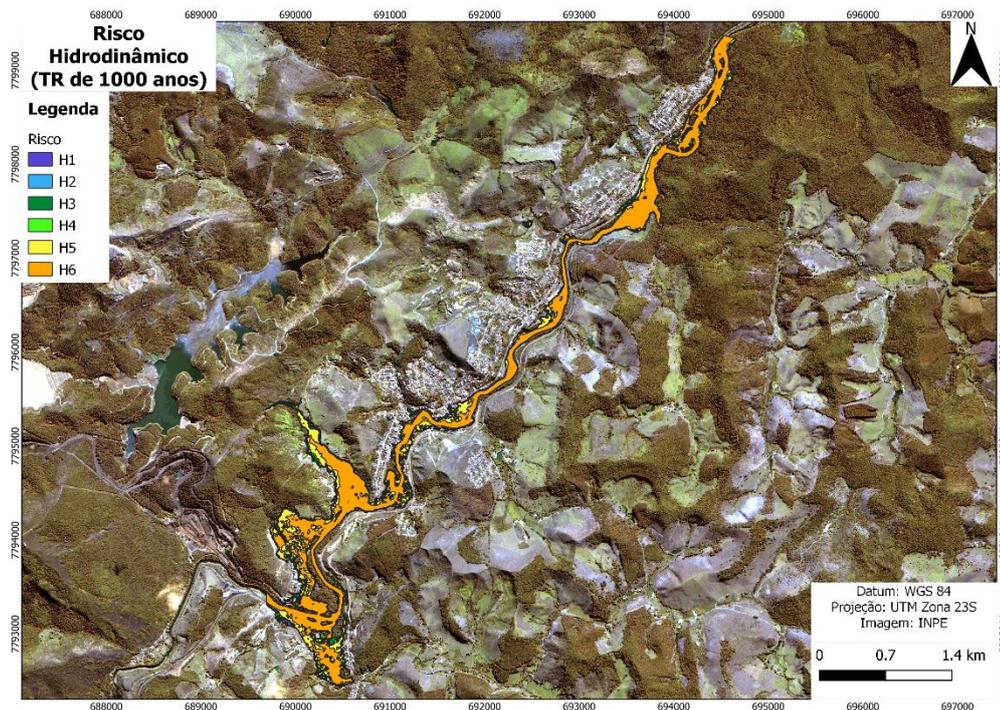


Figura 33 – Classificação Risco Hidrodinâmico –TR 1.000 anos – Rio Piracicaba (AUTOR, 2022).

A Tabela 10, consolida e apresenta as áreas, em km², observadas para cada cenário.

Tabela 10 – Áreas da Classificação Hidrodinâmica (AUTOR, 2022).

Classificação	Área (km ²)						
	Tempo de Retorno (anos)						
	2	5	10	50	100	200	1.000
H1	0,07	0,07	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05
H2	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03
H3	0,17	0,16	0,16	0,14	0,13	0,12	0,11
H4	0,17	0,19	0,19	0,18	0,16	0,16	0,14
H5	0,37	0,44	0,49	0,52	0,53	0,51	0,48
H6	0,39	0,57	0,66	0,87	0,96	1,04	1,22
TOTAL	1,21	1,48	1,61	1,80	1,86	1,92	2,03

A partir das manchas obtidas pela multiplicação dos *rasters* de profundidade e velocidade são observadas as classificações das zonas. Os resultados são concordantes com os esperados, uma vez que, com o aumento do TR, espera-se o

aumento da profundidade e da velocidade do escoamento, resultando em uma maior porção da mancha classificada em uma categoria de maior risco.

Observa-se que no cenário de TR 2 anos, identifica-se visualmente apenas a região do curso d'água classificada como H6, enquanto no cenário do TR de 1.000 anos, a mancha é classificada em sua quase totalidade como H6 (Insegura para veículos e pessoas, com todos os tipos de edifícios considerados vulneráveis à falha).

4.5 Análise dos Resultados

O desenvolvimento deste estudo explorou a identificação das regiões susceptíveis a inundações no município de Rio Piracicaba em Minas Gerais, durante eventos chuvosos que promovem determinadas vazões na calha do rio Piracicaba.

A obtenção das vazões para o estudo foi realizada pelo método direto, que parte da associação das vazões e seu referente período de retorno. Desta forma, para o estudo foram selecionados os TRs de 2, 5, 10, 50, 100, 200 e 1.000 anos, resultando em sete cenários para modelagem.

A partir dos resultados obtidos foi possível verificar a formação de zonas urbanas inundadas para os eventos associados à probabilidade de vazão máxima anual ser igualada ou excedida para o TR de 2 anos, desta forma, justificando o histórico da região de frequente transbordamento do canal e conseqüente inundação da área urbana.

Salienta-se que, devido ao MDE utilizado ser resultado de um levantamento por satélite, as cotas de fundo do canal possivelmente retratam a cota da superfície d'água durante a medição. Assim, a modelagem realizada é considerada conservadora, por retratar uma condição em que a calha do rio, possivelmente, apresenta seção reduzida em comparação a realidade do escoamento em campo.

No tocante à divergência de resultados obtidos para as velocidades no início do escoamento, é possível concluir que o pico observado na região pode ser causado pela concentração de vazões naquele ponto, causada pela proximidade com a condição de contorno de montante inserida. Para inferência desta instabilidade foi

realizada uma modelagem com a condição de contorno deslocada para uma porção a montante da proposta pelo estudo, sendo observadas, velocidades mais brandas (aproximadamente 4m/s) para região da instabilidade identificada para este estudo, e novamente um pico de velocidades no início do novo escoamento modelado. Logo, seria recomendável realizar a modelagem a partir de um trecho mais a montante do rio, para que o escoamento se tornasse mais uniforme ao atingir a região de interesse para os resultados. Porém, adotou-se para o desenvolvimento do estudo, a premissa de que região de instabilidade representa uma parcela de pequena proporção em relação a todo trecho da mancha, não influenciando nos resultados obtidos por este trabalho.

Com relação ao tipo de fluxo do trecho, pode-se classificar o escoamento no rio como subcrítico (fluvial), com velocidades de escoamento médias próximas a 2,1 m/s para o escoamento associado ao TR de 1.000 anos (pior cenário modelado). O escoamento é caracterizado, principalmente, pela baixa declividade média observada ao longo da calha na região do município (aproximadamente 0,0006 m/m), resultando em um regime subcrítico para todos os cenários modelados.

A fim da comparação dos resultados obtidos, não foram encontrados estudos similares desenvolvidos para a mesma região analisada, desta forma, escolheu-se os estudos desenvolvidos por Dos Reis et al. (2021) e Silva, Tauk-Tornisielo e Pião (2007), que tratam, respectivamente, dos rios Gualaxo do Norte - MG e Corumbataí - SP. A escolha destes estudos se deu por tratarem de escoamentos em canais da mesma natureza do modelado (naturais em seção aberta), sendo que o primeiro deles também é pertencente a bacia do Rio Doce.

No estudo desenvolvido por Dos Reis et al. (2021) é observada uma declividade média de 0,00556 m/m no leito do rio, ocasionando uma velocidade para o escoamento de, aproximadamente, 0,8 m/s durante o período chuvoso na região, tendo seu regime de escoamento classificado em sua totalidade como subcrítico. Por sua vez, o estudo realizado por Silva, Tauk-Tornisielo e Pião (2007), descreve, segundo o perfil da calha apresentado, um trecho de jusante de, aproximadamente,

0,0011 m/m de declividade, apresentando uma velocidade de 0,74 m/s em período chuvoso.

Acerca dos mapas de risco hidrodinâmico do município, os resultados encontrados classificam grande parte das zonas inundadas como inseguras para veículos e pessoas, mesmo quando se observa escoamentos associados aos menores TRs estudados, expondo o alto risco causado à população local durante os eventos e a necessidade de medidas de intervenção relativas a ocupação destas áreas.

Os resultados apresentados identificam as zonas localizadas na região mais a montante do rio Piracicaba, presentes no município, como mais susceptíveis a eventos de inundação durante uma cheia extrema. A Figura 34, apresenta a referida região sob a mancha associada ao TR de 1.000 anos.

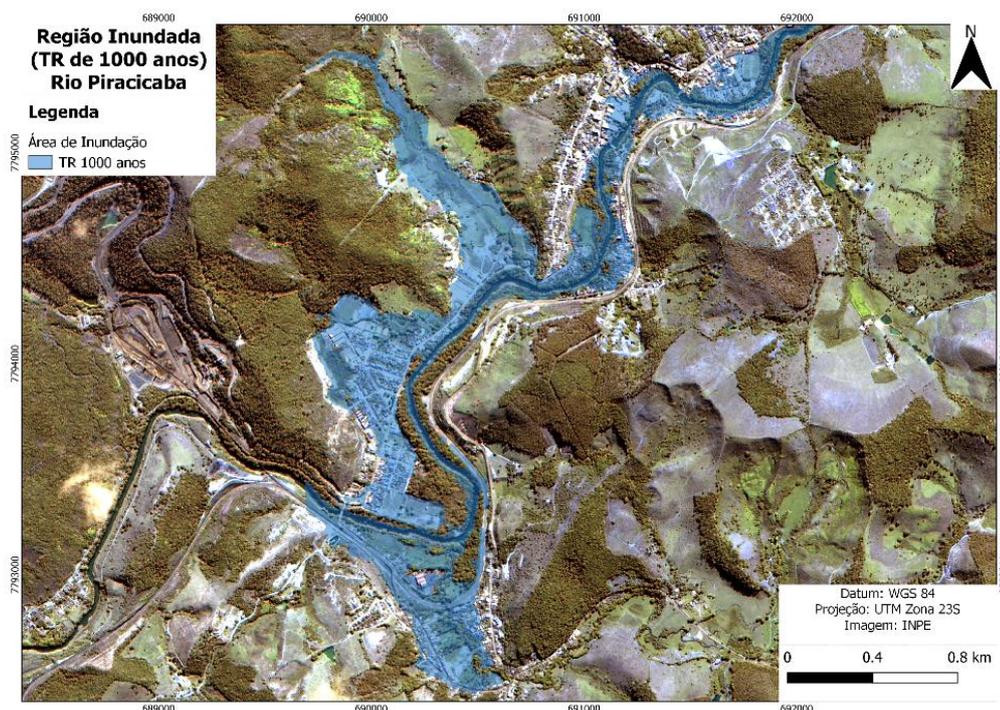


Figura 34 – Região tida como mais susceptível a inundações (AUTOR, 2022).

Pode-se perceber que os eventos de inundação da área urbana do município são caracterizados pela ocupação indevida da região de leito maior na calha do curso

d'água. Desta forma, quando são observados eventos de maior magnitude, o rio escoar pelo seu leito maior, causando a submersão de parte da zona urbana do município.

5 CONCLUSÃO

Em linhas gerais, pode-se concluir que a região do município de Rio Piracicaba pode ser considerada como de alta susceptibilidade a inundações. De acordo com os dados obtidos pela modelagem hidráulica da região, eventos que extrapolam as vazões associados ao tempo de retorno de 2 anos são capazes de acarretar transbordamento da calha do rio.

É importante salientar que o estudo em questão representa cenários conservadores para análise da bacia, visto que o MDE adotado, foi obtido através do levantamento por imagens de satélite, e as cotas de fundo do canal, possivelmente, representam a altura da lâmina d'água no momento das medições.

Os eventos de inundação da área urbana do município são caracterizados pela ocupação indevida da região de leito maior na calha do curso d'água. Sendo que mesmo para os eventos associados a baixos TRs, grande parte da mancha de inundação, segundo a classificação de risco hidrodinâmico, é considerada insegura para veículos e pessoas.

Com o agravamento de eventos chuvosos na região sudeste do país, causado pela intensificação das mudanças climáticas e a intensa urbanização da região, promovendo a impermeabilização do solo e consequente redução do tempo de concentração das bacias, é possível identificar uma tendência de aumento na frequência e intensidade dos desastres ambientais associados a eventos chuvosos na região.

Assim, se faz necessária a intervenção, do ponto de vista governamental, para gestão da região frente a estes eventos. No âmbito da engenharia, a partir da identificação das áreas de risco, sugere-se as seguintes medidas, que podem ser aplicadas de forma isolada ou em conjunto, de acordo com o desenvolvimento do projeto:

- Elaborar um Plano de Ação Emergencial (PAE) para situações de risco eminente;

- Realocar as famílias e demais construções que estejam identificadas sob a mancha de inundação;
- Adaptar o Plano Diretor do município, com a definição de zonas de proteção ambiental, evitando a ocupação indevida de regiões classificadas como de alto risco;
- Realizar obras de drenagem ao longo da bacia do rio, que possibilitem a infiltração do escoamento superficial no solo e ou aumentem o tempo de concentração da bacia;
- Realizar obras de drenagem para transposição das vazões de cheia que ocorrem na calha do Rio Piracicaba e
- Realizar obras para alargamento da calha ou canalização do leito menor do rio.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, recomendam-se:

- A aplicação de estudo hidrológico mais detalhado para região, considerando o aumento da pluviosidade no estado de Minas Gerais, causada pelas mudanças climáticas;
- Refinamento do modelo hidrológico e dos parâmetros hidráulicos utilizados;
- Levantamento topográfico/batimétrico detalhado da calha fluvial do trecho, visando o refinamento das cotas de fundo, tendo em vista que o MDE utilizado por este estudo representa, possivelmente, como cotas de fundo o nível d'água no momento da medição por satélite;
- O estudo de viabilidade de obras de drenagem para a bacia hidrográfica do Rio Piracicaba, visando a atenuação das vazões no leito do curso d'água e
- Estudo detalhado do plano diretor do município com sugestões para adaptação do documento, vislumbrando as áreas aqui determinadas como mais susceptíveis para inundações.

REFERÊNCIAS

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *Modelo Digital de Elevação (MDE) de alta resolução espacial (células de 1m), Imagens de satélite de Alta Resolução (0,5m), Pontos de Controle e Curvas de Nível com equidistância de 1m para os 26 municípios elencados pelo Comitê de Bacia do Rio Doce*. Disponível em:

<<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/830d00e6-9924-469d-b24b-aff67a1fd432>>.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *Uso e Ocupação do Solo em moderada resolução espacial (10m) da Bacia do Rio Doce*. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/49a3aa22-fff4-4527-a17b-64b6ad31d8cb>>.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *Usos da água*. Disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/ usos-da- agua>>.

BAPTISTA, M. B.; LARA, M. M. *Fundamentos de Engenharia Hidráulica* Livro, 2014.

CÂNDIDO, M. de O. *SEAF – Sistema Especialista de Análise de Frequência*, 2003. Disponível em: <<https://www.ehr.ufmg.br/downloads/>>.

CANHOLI, A. P. *Drenagem urbana e controle de enchentes*. São Paulo: Oficina de Textos. 2014.

CARVALHO, J. R. P. de; ASSAD, E. D.; OLIVEIRA, A. F. de; PINTO, H. S. Annual maximum daily rainfall trends in the midwest, southeast and southern Brazil in the last 71 years. *Weather and Climate Extremes*, v. 5, n. 1, p. 7–15, 2014.

CHOW, V. T. *Open Channel Hydraulics* Open Channel Hydraulics, 1959.

DALAGNOL, R.; GRAMCIANINOV, C. B.; CRESPO, N. M.; LUIZ, R.; CHIQUETTO, J. B.; MARQUES, M. T. A.; NETO, G. D.; DE ABREU, R. C.; LI, S.; LOTT, F. C.; ANDERSON, L. O.; SPARROW, S. Extreme rainfall and its impacts in the Brazilian Minas Gerais state in January 2020: Can we blame climate change? *Climate Resilience and Sustainability*, 1, e15. 2022.

DOS REIS, D. A.; DA SILVA, P. K.; AZEVEDO, I. A.; CASTRO, A. L. P.; SANTIAGO, A. F. Hydraulic and auto-depurative characteristics of the Gualaxo do Norte River after the Fundão dam rupture. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, n. 36, p. 50593–50601, 2021.

IBGE. *Censo 2010*, 2010. . Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/>>.

PORTO, R. *Hidráulica Básica - 4ª Edição - Rodrigo de Melo Porto*, 2006.

SILVA, G. M. de P.; TAUKE-TORNISIELO, S. M.; PIÃO, A. C. S. Capacidade De Autodepuração De Um Trecho Do Rio Corumbataí, Sp, Brasil. *Holos Environment*, v.

7, n. 2, p. 139, 2007.

SILVA, T. *Modelagem hidráulica do canal do rio Granjeiro, Crato/CE, utilizando o programa computacional HEC-RAS*. 2013.

SMITH, G. P.; DAVEY, E. K.; COX, R. J. Flood Hazard, WRL technical report 2014/07. *WRL Technical Report 2014/07*, n. September, 2014.

SUÁREZ, Y. V. R. *Estudo da Resistência ao Escoamento em Canais de Fundo Fixo* - Dissertação de Mestrado. p. 95, 2000.

TUCCI, C. E. M. Águas Urbanas. *In: TUCCI, C. E. M; BERTONI, J. C. Inundações urbanas na América do Sul*. Porto Alegre, 2003.

TUNDISI, J. G. Novas perspectivas para a gestão de recursos hídricos. *Revista USP*, v. 0, n. 70, p. 24, 2006.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual Version 5.0. n. CPD-68A, p. 1–171, 2020. Disponível em: <www.hec.usace.army.mil>.