

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

ROLNEI ROSA DA SILVA

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA DO RIO TAQUARI NO MUNICÍPIO DE
ENCANTADO/RS**

**São Leopoldo
2020**

ROLNEI ROSA DA SILVA

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA DO RIO TAQUARI NO MUNICÍPIO DE
ENCANTADO/RS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil, pelo Curso de
Engenharia Civil da Universidade do Vale
do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Me. Arthur da Fontoura Tschiedel

São Leopoldo

2020

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida.

A minha família que sempre me apoiou e incentivou em todos os momentos do curso, principalmente nesta etapa final.

Ao meu professor orientador Arthur da Fontoura Tschiedel por todo conhecimento compartilhado pela paciência e ajuda em todas revisões.

A todos professores da Unisinos pelo conhecimento e dedicação que me passaram.

Aos meus colegas do curso que se tornaram meus amigos durante toda essa caminhada.

Aos meus colegas e amigos Diogo Pereira e Victor Wildner pela parceria e amizade durante o curso.

A todas as pessoas que de alguma forma contribuíram durante esse momento da minha vida.

RESUMO

Muitos municípios da região do Vale do Taquari, região central do estado do Rio Grande do Sul/BR, são constantemente atingidos por eventos de cheia do rio Taquari-Antas. Na região, são observados casos semelhantes de ocupação de áreas ribeirinhas e eventos reincidentes de inundação dessas áreas. Visto que a modelagem hidrodinâmica é uma ferramenta muito eficiente para simular cenários críticos de inundações, o presente trabalho apresentou a simulação hidrodinâmica de eventos de inundações com diferentes tempos de retorno para o rio Taquari-Antas junto ao município de Encantado/RS. Foram realizadas simulações com o uso do software HEC-RAS 5.0.7, para modelagem 2D em regime não permanente a partir da série histórica de vazões registradas pela estação fluviométrica de Encantado. O sistema computacional utilizado possibilitou o desenvolvimento de manchas de inundações para diferentes tempos de retorno e, assim, pode-se obter resultados para uso em comparações com dados existentes nos planos de risco adotados pelo município. A simulação 2D mostrou-se bastante estável para representar a hidrodinâmica do rio escoando nas planícies de inundação. Os resultados mostram a expansão da mancha de inundação à medida que os tempos de retorno adotados foram aumentando, assim, pode-se fazer comparação com as áreas demarcadas pelas medidas de segurança adotadas pelo município e observar que existem áreas com potencial de inundação que não estão incluídas nas áreas de risco. Os resultados obtidos mostraram-se parecidos com eventos reais que atingiram a região.

Palavras-chave: Simulação hidrodinâmica, Manchas de inundação, Medidas de proteção.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema demonstrando diferença entre inundação e enchente	18
Figura 2 - Inundação de 1941, rua do centro da cidade e mapa de inundação, sendo a cota de inundação 4,75m.	28
Figura 3 - Inundação de 1967, rua do centro e mapa de inundação, sendo a cota de inundação 3,13 metros.	29
Figura 4 - Inundação de 2015, dique de proteção centro e mapa de inundação, sendo a cota de inundação 2,94 metros.	29
Figura 5 - Mancha de inundação, tempo de retorno 20 anos	40
Figura 6 - Mancha de inundação, tempo de retorno 50 anos	40
Figura 7 - Mancha de inundação, tempo de retorno 100 anos	40
Figura 8 – Setores de risco alto e risco muito alto.....	43
Figura 9 – Localização da área de estudo	46
Figura 10 - Regiões Hidrográficas do Rio Grande do Sul	47
Figura 11 – Bacia hidrográfica Taquari-Antas e localização área de estudo.....	48
Figura 12 – Localização da bacia Taquari-Antas.	48
Figura 13 – Largura da calha do rio em metros.....	50
Figura 14 – Localização da estação fluviométrica 86720000 de Encantado/RS	54
Figura 15 – Diferentes coeficientes Manning adotados neste trabalho para área de simulação.	58
Figura 16 - Modelo Digital de Elevação (MDE).	59
Figura 17 – Mancha de inundação para TR = 5 anos	64
Figura 18 – Mancha de inundação para TR = 10 anos	65
Figura 19 – Mancha de inundação para TR = 25 anos	66
Figura 20 – Mancha de inundação para TR = 100 anos	67
Figura 21 – Mancha de inundação para TR = 500 anos	68
Figura 22 – Variação da mancha de inundação conforme elevação do TR	69
Figura 23 – Localização da seção transversal do hidrograma do modelo.....	70
Figura 25 – Setorizações de risco atuais sobrepostas as antigas.....	71
Figura 26 – Mancha de inundação sobreposta aos setores de risco.	72
Figura 27 – sobreposição aos setores SR-5, SR-6 e SR-7.	73
Figura 28 – Sobreposição aos setores SR-3 e SR-4.....	73
Figura 29 – Sobreposição ao setor SR-8.	74

Figura 30 – Sobreposição ao setor SR-9.74

LISTA DE IMAGENS

Imagem 1 - Dique do Município de Porto Alegre/RS.....	34
Imagem 2 - Inundação Encantado/RS, 09 de junho de 2020.....	52
Imagem 3 – Inundação bairro Navegantes ocorrida em junho de 2020.	76
Imagem 4 – Comparação do evento de inundação de junho de 2020 com os TR 25 e TR100 na localização da empresa Fontana S.A.	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais inundações no Brasil 1911-2011.	26
Quadro 2 – Classificação dos graus de risco para enchentes e inundações	42

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Hidrogramas para os TRs adotados.....	57
Gráfico 2 – Cotograma de cheia ocorrida no final de maio de 1990.....	60
Gráfico 3 - Hidrograma das vazões para os TRs simulados	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempo de retorno associado a estrutura hidráulica.	22
Tabela 2 - Maiores inundações 1900-2012 e números de pessoas mortas.	25
Tabela 3 - Precipitação acumulada de 10 de abril a 14 de maio de 1941 nas principais cidades do Estado.....	27
Tabela 4 - Coeficiente de Manning para diferentes superfícies.....	38
Tabela 5 – Síntese dos setores de risco alto e risco muito alto.	42
Tabela 6 – Dez maiores inundações ocorridas em Encantado	51
Tabela 7 – Vazões máximas anuais obtidos da estação 86720000 Encantado, sem computar os anos com falhas.....	55
Tabela 8 – Vazões para cada TR, vazão máxima, vazão média e desvio padrão, das medias anuais	56

LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Água
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CVS	Arquivo com valores separados por vírgula
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center-River Analysis System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
Km	Quilômetro
m	Metro
m ³	Metro cúbico
MDB	Arquivo de banco de dados
MDE	Modelo digital de elevação
MDS	Modelo digital de superfície
MDT	Modelo digital do terreno
METROPLAN	Fundação Estadual de Planejamento Metropolitano e Regional
m ³ /s	Metros cúbico por segundo
NR	Nível de referência
OCHA	Escritório da ONU para os Assuntos Humanitários.
ONU	Organização das Nações Unidas
p	Probabilidade de ocorrência
PNPDEC	Política de proteção e Defesa Civil
PRJ	Arquivo de texto que descreve o sistema projeção cartográfica do dado geográfico shape
RMPA	Região Metropolitana de Porto Alegre
RS	Rio Grande do Sul
s	Segundos
SACE	Sistema de Alerta de Eventos Críticos
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
TR	Tempo de retorno
TXT	Extensão de arquivo
USACE	Corpo de Engenharia Hidrológica do Exército dos Estados Unidos

UTM	Universal Transversa de Mercator
Δt	Intervalo de tempo
Δx	Intervalo de distância

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Tema	16
1.2 Delimitação do Tema	16
1.3 Problema	16
1.4 Objetivos	17
1.4.1 Objetivo Geral	17
1.4.2 Objetivos Específicos	17
1.5 Justificativa	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Enchentes e Inundações e Alagamentos e Enxurradas	18
2.2 Variabilidade e Vazões máximas	20
2.2.1 Variabilidade natural das vazões.....	21
2.2.2 Tempo de Retorno	21
2.2.3 TR associado a cheias (vazões máximas em rios)	22
2.2.4 Gumbel.....	23
2.3 Inundações ribeirinhas	24
2.3.1 Cheia de 41 do município de Porto Alegre	26
2.3.2 Impactos no Sociedade	30
2.4 Medidas de Controle	31
2.4.1 Medidas não-estruturais	31
2.4.2 Medidas estruturais	32
2.4.2.1 Diques	32
2.5 Modelagem Hidrodinâmica	35
2.6 HEC-RAS	36
2.6.1 Dados de entrada necessários	36
2.6.2 Topografia do terreno (Modelo Digital de Elevação MDE <i>raster</i>)	37
2.6.3 Coeficientes Manning	37
2.6.4 Equação de Saint-Venant.....	38
2.6.5 Trabalhos desenvolvidos com o uso do HEC-RAS em modelagem hidrodinâmica.....	39
2.7 Medidas públicas de gestão de risco no município de Encantado	41
3 ÁREA DE ESTUDO	45

3.1 Bacia hidrográfica Taquari-Antas	46
3.1.2 Características geomorfológicas e hidrológicas da bacia Taquari-Antas	49
3.2 Histórico de inundações no município de Encantado/RS.	51
4 METODOLOGIA	53
4.1 HEC-RAS	53
4.2 Dados de entrada utilizados	53
4.2.1 Dados da estação fluviométrica	53
4.2.2 Hidrograma de entrada.....	56
4.2.3 Coeficiente de Rugosidade de Manning.....	57
4.2.4 Modelo digital de elevação e área de avaliação.....	58
4.2.5 Tempo de simulação	59
4.2.6 Discretização da malha e intervalo de computação (passo de tempo) da simulação	60
4.2.6.2 Número de Courant.....	62
4.2.7 Condições de contorno.....	62
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
5.1 Mapas de inundação	63
5.3 Comparação dos resultados obtidos	72
6 CONCLUSÃO	75
REFERÊNCIAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

As civilizações ao longo dos tempos se desenvolveram, principalmente, perto de curso de águas ou grandes rios, devido a necessidade de uso de água para seu bem-estar, desenvolvimento de suas necessidades básicas de consumo e manter as atividades como a agricultura, a pecuária e a indústria. Essas áreas, geralmente são localizadas nas várzeas e planícies dos rios e podem sofrer inundações durante as cheias. São os regimes naturais dos recursos hídricos, as elevações de cotas de cheias e a ocupação das planícies de inundações. (ENOMOTO, 2004 apud OLIVEIRA, 2007).

As enchentes e inundações são fenômenos naturais dos rios, e não devem ser tratadas diretamente como um problema. Pois só ocorrem situações de desastres e perdas se houver ocupação humana nas áreas de inundações, e nessa situação pode gerar problemas sociais, econômicos e ambientais. (SANTOS, 2007).

As inundações são grandes problemas para cidades quando áreas urbanas se desenvolvem próximo aos rios. As inundações são eventos que ocorrem, quando a capacidade de escoamento natural de um rio ou córrego ultrapassa o limite máximo de escoamento e extrapola para o leito maior. Esses eventos são de caráter natural dos rios e podem ser maximizados devido a alterações como: Urbanização, impermeabilização do solo e canalização dos rios (TUCCI; BERTONI, 2003).

Segundo o Portal São Francisco (2020), as inundações podem ser de ordem natural ou não natural. Ocorrem quando o leito de um rio recebe um grande volume de água acima do limite que pode comportar. São, entre as catástrofes naturais, as mais prejudiciais, tanto de ordem econômica, quanto à saúde de uma população. Os efeitos gerados à saúde são de caráter direto e indireto:

- Perda de vidas;
- Abandono de lares inundados, perda de objetos levados pela correnteza;
- Contaminação da água por produtos tóxicos;
- Contaminação da água com agentes patogênicos que provocam doenças como Amebíase, Cólera, Febre Amarela, Hepatite A, Malária, Poliomielite, Salmoneose, Teníase, Leptospirose, entre outras;
- Contaminação de alimentos pelos mesmos agentes patológicos acima citados;

- Interrupção econômica das áreas inundadas.

No Brasil, as inundações são eventos que ocorrem em muitas cidades, sendo que, no estado do Rio Grande do Sul, são recorrentes em muitos municípios junto aos rios que compõem a Bacia Guaíba. A história de Porto Alegre é marcada pela grande enchente de 1941, ano do evento, em que as águas do rio Guaíba adentraram nas ruas do centro e bairros próximos. Foram 22 dias de chuva com 791 mm de precipitação registrados na capital. (Jornal do Mercado, 2006).

Evitar que inundações causem danos em determinados locais requer medidas de controles, que possibilitem à sociedade, algum domínio sobre alguns eventos de cheia. Para evitar problemas com inundações as cidades atingidas geralmente tomam medidas preventivas, tanto de caráter estruturais com não-estruturais. Nos anos 70, foram construídos sistemas de proteção contra cheias na no município de Porto Alegre. No projeto foram adotados diques de concreto no centro da cidade e enrocamento no restante, ainda foram adotados sistemas de bombas para drenar o escoamento interno do município. Desde a sua construção, o sistema construído para proteger o centro da cidade nunca teve que trabalhar de forma significativa, o que tem posto em questionamento, por urbanistas e ambientalistas, a necessidade desta estrutura de concreto na área central da cidade, que praticamente impede o acesso de pessoas ao rio. (TUCCI, 2007).

Diques são estruturas executadas com a finalidade de conter as vazões de inundação de um canal e garantir a proteger as regiões ribeirinhas. Em geral, essas estruturas são construídas no formato de barras ao longo da margem dos rios ou oceanos. Podem ser construídas em concreto, mais seguros, e outros tipos como enrocamento. Os diques têm sua capacidade de proteção limitada pela altura limite da estrutura, pois quando a onda de inundação ultrapassa o limite, estabelecido em projeto, põe em risco às áreas de inundação. (CORDEIRO, MEDEIROS e TERAN, 1999 apud IMPULCETTO, 2017). Medidas de controle de inundações podem ser de caráter estruturais e não-estruturais. As medidas estruturais modificam o escoamento e necessitam que o sistema fluvial natural seja alterado. As não-estruturais adotam medidas preventivas que exige a convivência da população com as inundações. No entanto, medidas de contenção podem ser adotadas de forma conjunta, estruturais e não-estruturais, o que permite uma melhor condição de vida aos habitantes de áreas ribeirinhas. (TUCCI e BERTONI, 2003).

Mediante as situações de repetidos eventos de inundações em diversas cidades da bacia Taquari-Antas, o presente trabalho tem como objetivo realizar a simulação hidrodinâmica no rio Taquari-Antas, junto ao município de Encantado/RS e gerar manchas de inundação para diferentes tempos de retornos. Com os resultados, buscou-se obter as áreas com cenários mais crítico e realizar comparações com as medidas de segurança adotadas atualmente no município.

1.1 Tema

Modelagem hidrodinâmica do rio Taquari-Antas, no município de Encantado/RS, e estudo de inundações a partir de cenários com diferentes tempos de retorno.

1.2 Delimitação do Tema

O estudo apresentado analisa as manchas de inundação obtidas com a simulação hidrodinâmica e realiza comparação com as medidas de segurança adotadas pelo município. Para isto foi utilizado modelo digital de elevação (MDE) da região sem realizar a batimetria do fundo do rio. Os resultados obtidos para os tempos de retorno (TR) 5, 10, 25, 100 e 500 anos, sendo que, foram realizadas comparações com as medidas de segurança adotadas pelo município apenas com o TR 100 anos.

1.3 Problema

A região do vale do Taquari tem apresentado constantes problemas com inundações de diversos municípios com grande potencial de perdas. O problema é agravado devida à situação de desenvolvimento de municípios que ocupam áreas ribeirinhas, nas planícies de inundação do rio Taquari-Antas, um importante rio que corta a região de norte a sul e tem proporcionado o desenvolvimento dos municípios.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral realizar a simulação hidrodinâmica do rio Taquari-Antas e obter manchas de inundação para regiões ribeirinhas do município de Encantado/RS.

1.4.2 Objetivos Específicos

- a) Construir um modelo hidrodinâmico capaz de gerar manchas de inundação no rio Taquari-Antas, no município de Encantado/RS;
- b) Identificar áreas urbanas dentro das manchas de inundação;
- c) Realizar comparações com medidas de segurança adotadas pelo município.

1.5 Justificativa

A região do vale do Taquari/RS tem parte inserida na bacia Taquari-Antas, sendo que muito municípios da região apresentam problemas gerado pelas inundações recorrentes do rio Taquari-Antas. O rio Taquari-Antas é principal rio da bacia e possui características diferentes em algumas regiões, sendo que apresenta planícies de inundação na parte de menor declividade no baixo Taquari. O município de Encantado está entre os municípios mais atingidos por eventos de cheia do rio. Os eventos de inundação no município de Encantado são repetitivos e geram grandes prejuízos econômicos e sociais ao município, o que impede um melhor desenvolvimento e afeta a qualidade de vida dos habitantes das áreas ribeirinhas.

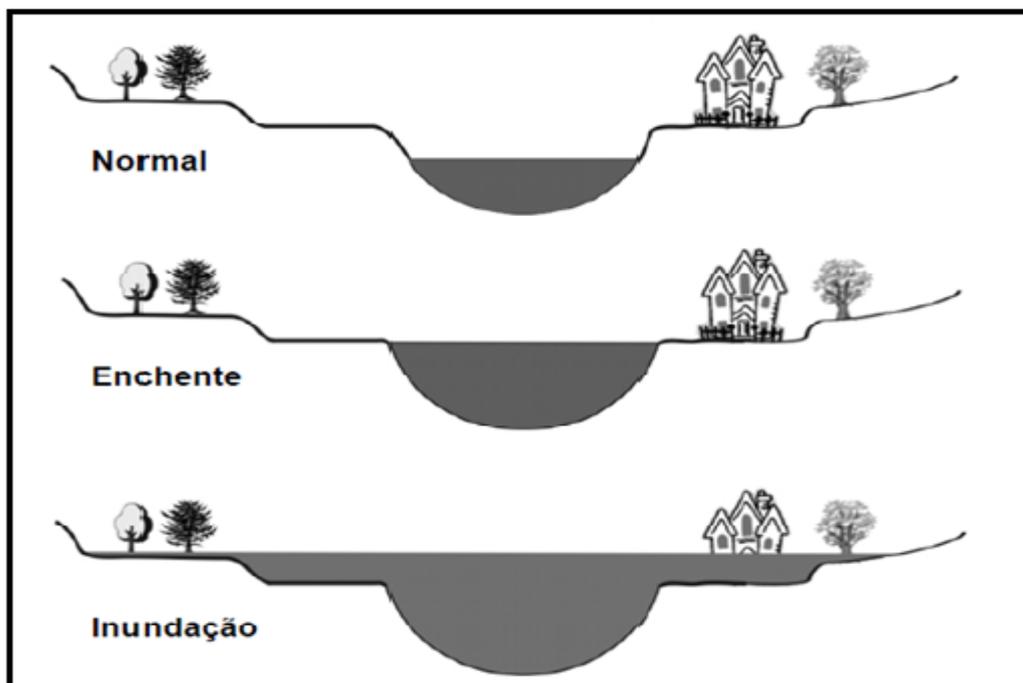
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Entre os desastres naturais mais assoladores no mundo, pode-se afirmar que as inundações são as que mais geram danos, pois ocorrem com maior frequência em um mesmo local e atingem grandes áreas. (SAUSEN, 2013). As inundações são eventos antigos e que faz parte da história de muitas cidades. As inundações são eventos naturais que ocorrem quando os rios, devido as cheias, passam a ocupar as planícies. (TUCCI; BERTONI, 2003).

2.1 Enchentes e Inundações e Alagamentos e Enxurradas

Muitos fenômenos de inundação são chamados, muitas vezes, erroneamente de enchentes. O termo enchente significa encher, derivado do *Latim*, tem seu sentido de ocupar. Então, a enchente pode caracterizar quando o rio enche e ocupa todo seu leito de escoamento e quando se eleva acima dele, forma assim a inundação, ou seja, extravasa para o leito maior e passa a escoar nas regiões de planícies de inundação. (KRON, 2002 apud GOERLI, KOBİYAMA, 2005). A figura 1 demonstra essas diferenças.

Figura 1 - Esquema demonstrando diferença entre inundação e enchente



Fonte: Goerli e Kombiyama (2002).

Enchentes também são definidas como enxurradas, quando ocorrem em pequenas bacias. Geralmente as enxurradas são eventos de alta intensidade de chuvas e tem capacidade de grandes estragos e erosões de margens. (SANTOS, 2007). As enchentes podem ser definidas como calamidades naturais ou não. Pois podem ser promovidas pelos eventos naturais de excesso de precipitação ou por problemas gerados nas modificações e alterações da natureza, devido as necessidades humanas, e ao crescimento de forma não planejado das cidades. As inundações são fenômenos de maior intensidade do que as enchentes, pois a água ocupa além da várzea de inundação. Geralmente ocorrem a cada 20 ou 30 anos, provocados por chuvas excepcionais, muito intensa ou contínuas. (PORTAL SÃO FRANCISCO, 2020). As enchentes são eventos naturais que ocorrem em todos ambientes fluviais, geralmente ocorrem junto das inundações, pois antecedem este processo. As enxurradas são definidas pela intensidade do escoamento, podem ocupar o mesmo lugar das inundações, mas sendo analisado principalmente a velocidade de escoamento do rio. Podem transportar facilmente grande quantidade de sedimentos ou rochas. (CASTRO, 1998, apud OLIVEIRA, 2010).

Os eventos de inundações são gerados pelas precipitações intensas e o volume de água que escoar pela calha do rio é maior do ela pode suportar, fazendo que passe a escoar pela calha maior, ou seja as regiões de várzea ou ribeirinhas. (TUCCI; BERTONI, 2003).

Os alagamentos são enquadrados como as inundações urbanas que ocorrem no sistema de drenagem urbana, devido às precipitações de grande intensidade. (TUCCI, 2003).

AS inundações podem assumir características diferentes em cada região, devido a cada bacia apresentar características únicas. Bacia hidrográfica é definida como a área de captação da água precipitada e que gera escoamento que converge para um único ponto de saída, o seu exutório. Uma bacia hidrográfica pode conter outras várias bacias menores, as sub-bacias, que são as divisões da área da grande bacia em outras bacias hidrográficas menores. A bacia hidrográfica é um sistema onde apresenta: As entradas de águas, eventos de precipitação, e as saídas de águas, escoamento e evapotranspiração. (COLLISCHONN; TASSI, 2008).

O abastecimento de água numa bacia hidrológica é possível devido ao ciclo hidrológico. O ciclo hidrológico inicia através da energia solar, que fornece calor para todo o sistema funcionar. Os processos do Ciclo Hidrológico são: precipitação,

infiltração, escoamento, evapotranspiração e condensação. O aquecimento da água superficial, solo e ar, faz o processo de colocar vapor de água na atmosfera que será transportada até retornar para o solo ou oceanos na forma de chuva. As maiores contribuições de vapores de água são a partir das águas dos oceanos, e retornam para eles através do escoamento dos rios e infiltrações subterrâneas. A água que precipita nos continentes, antes de voltar para os oceanos, podem participar de um novo ciclo hidrológico e ainda um outros, o que são chamados subciclos. Ao atingir o solo a precipitação pode ter um escoamento superficial ou infiltração no solo e alimentar os aquíferos. (COLLISCHONN; TASSI, 2008). Ainda, segundo os autores, a geração de escoamento pode se dar de diversas formas diferentes. Isto porque, cada bacia hidrográfica tem suas características quanto ao solo, inclinações e da vegetação, e, ainda, pode sofrer a influência da temperatura média de cada região.

O clima de uma região é influenciado pela circulação atmosférica. As variações de tempo no ambiente atmosférico estão sempre em contínuas mudanças e proporcionam o deslocamento de massas atmosféricas. Na Região Sul do Brasil, está inserida na zona climaticamente de transição, sendo assim, recebem as massas e frentes polares e as massas tropicais. Isso faz com que a região esteja numa área de atuação de dois sistemas atmosféricos diferentes, proporcionando a distribuição de chuva bem distribuída durante o ano. (SARTORI, 2002).

As precipitações, quando acontecem em grandes intensidades e duração, podem gerar alagamentos, enchentes e inundações. Essas características de eventos de chuvas não podem ser controladas e podem ocorrer sem previsões. (SANTOS, 2007).

2.2 Variabilidade e Vazões máximas

A chuva pode ser medida através de pluviômetros, que, são recipientes que captam a água precipitada. No Brasil, alguns pluviômetros são analisados diariamente e tem seus dados registrados em agências como a Agência Nacional de Água (ANA) e, ou, Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A vazão de um rio depende de como a bacia interage com a precipitação. Isso ocorre mediante as características da bacia hidrológica. A precipitação que incide sobre uma bacia gera escoamento e dependendo da intensidade provoca alterações na vazão do rio. O

escoamento superficial é a parte da precipitação que não infiltra no solo e escoar diretamente para o rio e, quando são de grande intensidade e duração, podem proporcionar eventos de cheia. O escoamento subterrâneo é gerado pela água que infiltra no solo e gera vazão no rio mesmo em períodos sem precipitação. (COLLISCHONN; TASSI, 2008). Ainda, segundo os autores, a vazão de um rio é definida como o volume de água que passa numa determinada seção do rio num intervalo de tempo, dada em metros cúbicos por segundos.

2.2.1 Variabilidade natural das vazões

As contribuições para as vazões se dão através do escoamento superficial e subsuperficial e a precipitação que ocorre no próprio rio. Dessa forma, a não linearidade das vazões em um ponto do rio está associada ao tipo de escoamento que se tem na bacia e o tipo de infiltração. (CHOW *et al.*, 1994 apud CAPOZZOLI *et al.*, 2017). O regime hidrológico de um rio é caracterizado com as curvas representativas e depende dos dados de vazões. Essas curvas são desenvolvidas com a série histórica de vazões que representa a variabilidade hidrológica. (COLLISCHONN, 2006 apud GENZ; LUZ, 2007).

2.2.2 Tempo de Retorno

As estruturas hidráulicas são dimensionadas com possível probabilidade de haver alguma falha. Para desenvolver os projetos, que dependem das vazões de rios, ou seja, estruturas hidráulicas, é adotado a probabilidade de determinado evento de vazão se repetir num determinado período. Os riscos podem ser definidos para vazões máximas e mínimas, o que depende do tipo de uso do rio. (COLLISCHONN; TASSI, 2008). Uma estrutura hidráulica pode ter o grau de risco definido conforme estimado em projeto, que pode ser definida a partir da probabilidade de um evento hídrico ser maior que o de projeto. (BAPTISTA, NASCIMENTO e BARRAUD, 2005 apud KUREK, 2012).

Tempo de retorno (TR) pode definir a probabilidade de um evento de determinada vazão se repetir num dado período. É desenvolvido através de dados histórico de vazões em determinado local, e pode ser calculado pela fórmula: $TR = 1/P$; onde TR é o período de retorno (em anos) e P a probabilidade. Assim, o tempo

de retorno é o inverso da probabilidade de um dado evento se repetir. (SILVA, 2004 apud IMPULCETTO, 2017 p.16).

2.2.3 TR associado a cheias (vazões máximas em rios)

A vazão máxima em um rio está associada a uma determinada intensidade que pode igualar ou ultrapassar algum valor (período de retorno). (SANTOS, 2010 apud WATANABE, 2013). Projetos de estruturas hidráulica são desenvolvidos admitindo a probabilidade de falha. Pois, não é economicamente viável dimensionar para a maior vazão. A probabilidade de falha aceitável depende diretamente do tipo de estrutura e ao abjeto de proteção ou uso. Geralmente o risco de falha está relacionado às vazões máximas. (COLLISCHONN; TASSI, 2008). A tabela 1 demonstra a tempo de retorno associado à algumas estruturas hidráulicas.

Tabela 1 - Tempo de retorno associado a estrutura hidráulica.

Estrutura	TR (anos)
Bueiros de estradas pouco movimentadas	5 a 10
Bueiros de estradas muito movimentadas	50 a 100
Pontes	50 a 100
Diques de proteção de cidades	50 a 200
Drenagem pluvial	2 a 10
Pequenas barragens	100
Grandes barragens (vertedor)	10.000

Fonte: COLLISCHONN, TASSI (2008).

Assim, estruturas hidráulicas, quando dimensionadas para atenderem vazões de cheia de projeto, num determinado tempo de retorno (TR), para cada ano de uso, a probabilidade dessa cheia de projeto ser superada é igual a $1/Tr$. (WATANABE, 2012).

Para verificar as vazões máximas aplica-se a probabilidade de excedência e de tempo de retorno. Os métodos de análise da probabilidade e tempo de retorno são empíricos e/ou analíticos. Sendo método empírico pouco preciso quando a amostragem é pequena, já a metodologia analítica permite utilizar de forma eficiente uma quantidade pequena de dados hidrológicos. Pode transformar dados de chuva ao longo de um ano em dados aleatórios o que permite uma melhor análise da

amostra. A partir de dados da série de vazões máximas de um rio é possível estimar a vazão para determinado TR. (COLLISCHONN; TASSI, 2008).

Para o desenvolvimento de projetos hidráulicos que trabalham em fator de vazões máximas, é necessário, pelo menos, uma série de dados de vazões anteriores. Como essas séries apresentam incertezas do seu registro ou até mesmo a não existência e para minimizar a falta de dados pode-se recorrer às funções densidade de probabilidade. (BRITO *et al.*, 2016 AVELAR, *et al.*, 2019).

2.2.4 Gumbel

Como não é possível prever o comportamento de vazões que ocorrerão ao longo da vida útil de um projeto hidráulico, tem-se recorrido ao uso leis de probabilidade e assim assumir riscos calculados. Mesmo que a vazão de projeto nunca tenha ocorrido ou não foi registrada é possível recorrer a análises estatísticas tendo, como dados iniciais, a série histórica ocorrida em um período de eventos menores e extrapolar para eventos com maiores intensidades. Assim, adota-se o uso de modelos de probabilidade que analisa as descargas máximas e a correspondente frequência que ocorreram, e prevê, para um futuro, a ocorrência de eventos de semelhante intensidade. (WATANABE, 2013).

Conforme Gumbel (1958 apud WATANABE, 2013), Fisher Tippett em uma série de dados de amostras observou que a ocorrência de eventos extremos, ou seja, fora do comum, não dependem da distribuição original e se comporta como função limite. Em 1948, Gumbel sugeriu a adoção desses valores extremos para análise de frequência de cheias, sendo necessário que a série fosse anual, ou seja, das 365 medições anuais, a máxima seria utilizada.

A Distribuição de Gumbel, distribuição de valores extremos tipo I, é dada pela equação 1.

$$FX(x) = p\{X < x\} = e^{-e^{-y}} \quad (1)$$

Onde x é vazão e y é a variável reduzida de Gumbel dada por:

$$y = \frac{x - \beta}{\alpha} \quad (2)$$

Onde β e α são parâmetros característicos da reta de Gumbel, em que, α representa o parâmetro da escala e β da posição.

A função densidade da distribuição de Gumbel é dada pela equação 3:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{x-\beta}{\alpha} - \exp\left(-\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right] \quad (3)$$

Explicitando-se a variável reduzida de Gumbel da equação 4, obtém:

$$y(F(x)) = -\ln[-\ln(F(x))] \quad (4)$$

A probabilidade de não excedência é dada por $F(x) = p\{X \leq x\}$, assim está para o tempo de retorno segundo a equação:

$$P\{\leq xp\} = 1 - \frac{1}{Tr} \quad (5)$$

Da combinação da expressão (3) e (5), obtém:

$$y(Tr) = -\ln\left[-\ln\left(-1/\frac{1}{\alpha}\right)\right] \quad (6)$$

Então, das equações 2 e 6 obtém-se:

$$x(Tr) = \beta - \ln\left[-\ln\left(-1/\frac{1}{Tr}\right)\right] \quad (7)$$

Sendo, Tr o período de retorno em anos.

2.3 Inundações ribeirinhas

Os rios possuem suas áreas de extravasamento, leito maior, onde podem escoar grandes volumes de água em tempos de cheias. Esses eventos de cheia se repetem, geralmente, a cada dois anos. Os problemas para as cidades são gerados quando há ocupação dessa área de inundação natural do rio. (Portal São Francisco, 2020).

Os rios geralmente possuem dois leitos, o leito menor onde a água escoar na maioria do tempo e o leito maior, que é inundado nos períodos de cheias. O impacto devido a inundação ocorre quando a população ocupa o leito maior do rio, ficando

sujeita a inundação. As inundações ribeirinhas são geradas, quando a capacidade de escoamento normal nas calhas dos rios, são ultrapassados. Devido às grandes precipitações o volume de água eleva a cota do rio e passa a ocupar a calha maior. Esse processo repetitivo gera um grande problema quando essas áreas de várzea são habitadas. Geralmente as populações mais pobres tendem a ocupar as áreas de risco à inundação, o que os tornam mais vulneráveis a risco repetidos. (TUCCI; BERTONI, 2003). Ainda, segundo os autores, quando esse ciclo de cheia são de pouca frequência, a população que ali habitam, ganham confiança e tendem a perder o medo. Nessa situação, podem ocorrer eventos catastróficos devido as enchentes. As inundações graduais ocorrem de forma lenta, devido a ocorrência de precipitações por vários dias ou intensa chuva por um pequeno período. (GOER, KOMBYAMA, 2005). Ainda, segundo os autores, geralmente ocorrem em áreas que permanecem secas por algum período e em grandes rios. Como ocorrem de forma lenta, causam poucas mortes, mas podem causar grandes estragos.

Segundo Sauzen (2012) as inundações são responsáveis por grandes danos e são classificadas como eventos que mais geram perdas humanas e econômicas em todo o mundo. A tabela 2, segundo o autor, mostra as maiores inundações ocorridas de 1900-2012.

Tabela 2 - Maiores inundações 1900-2012 e números de pessoas mortas.

País	Data	Nº Pessoas mortas
China inundação gradual	Jul/1931	3.700.000
China inundação gradual	Jul/1959	2.000.000
China inundação gradual	Jun/1939	500.000
China inundação gradual	1935	142.000
China inundação gradual	1911	100.000
China inundação gradual	Jun/1949	57.000
Guatemala inundação Gradual	Out/1949	40.000
China Inundação gradual	Ago/1954	30.000
Venezuela inundação gradual	Dez/1999	30.000
Bangladesh inundação gradual	Jul/1994	28.700

Fonte: Sausen, (2013).

Segundo o Escritório da ONU para os Assuntos Humanitários (OCHA, 2020), em estudo realizado, demonstra que as inundações são os desastres naturais que mais ocorrem no Brasil, desde o ano 2000, e aponta o Brasil, entre os 15 países do globo que possuem maior número de pessoas expostas a esse tipo de catástrofe. O estudo aponta, que no Brasil, 0,9% da população está exposta a riscos de inundações; 1,8 milhões de pessoas.

No Brasil, de 1900-2006, 59% dos desastres naturais foram eventos de inundações, sendo que, a partir dos anos 70 houve um aumento nas recorrências de inundações no país. (MARCELINHO, 2008 apud KUREK, 2012). O quadro 1 apresenta as inundações que mais impactaram no Brasil nos últimos cem anos.

Quadro 1 - Principais inundações no Brasil 1911-2011.

Rio de Janeiro	Janeiro/2011
São Paulo	Janeiro/2011
Alagoas e Pernambuco	2010
Rio de Janeiro	2010
São Luiz do Piratinga/SP	2010
Santa Catarina	Novembro/2008
Minas Gerais	2001
Acre	1997
Rio de Janeiro	1988
Blumenau	1983
Minas Gerais e Espírito Santo	1979
Cuiabá	1974
Santa Catarina	1974
Rio de Janeiro	1966 -1967
Porto Alegre	1941
Blumenau	1911

Fonte: Sausen, (2013).

2.3.1 Cheia de 41 do município de Porto Alegre

O município de Porto Alegre tem grande potencial de inundações devido estar junto ao Rio Guaíba, responsável por escoar a água de uma bacia de 82 mil Km². Ao

longo do século IX sofreu enchentes ribeirinhas repetidamente. (TUCCI, 1999). Em 1941 a cidade foi atingida por uma inundação nunca registrada antes. Foram, aproximadamente, 620mm de precipitação num período de 41 dias. (GUIMARÃES, 2013 apud DORNELLES *et al*, 2018). Os municípios pertencentes a Região Metropolitana de Porto Alegre – RMPA, estão inseridos numa área de grande potencial de inundações devido às características da bacia hidrográfica que pertencem apresentar grandes encontros hídricos no local. (TUCCI, 1999). A magnitude desse evento não foi só pelo fato de afetar o Município de Porto Alegre, mas por ocorrerem inundações em diversos municípios do Estado. A tabela 3 demonstra os números desse evento no em alguns municípios do Rio Grande do Sul. (VALENTE, 2015).

Tabela 3 - Precipitação acumulada de 10 de abril a 14 de maio de 1941 nas principais cidades do Estado.

Município	Precipitação total (mm)	Nº dias com precipitação
Bagé	468,3	21
Bento Gonçalves	432	15
Caçapava do Sul	489,5	22
Cachoeira do Sul	543,5	21
Caxias do Sul	545,6	19
Cruz Alta	728,7	16
Encruzilhada do Sul	610,9	23
Guaporé	706,7	20
Jaguarão	545	21
Júlio de Castilhos	603,7	16
Lagoa Vermelha	315,7	13
Passo Fundo	425,4	19
Piratini	325	22
Porto Alegre	619,4	22
Rio Grande	379,7	24

Santa Cruz do Sul	757,8	24
Santa Maria	905,3	20
Santa Vitória do Palmar	431,6	21
São Francisco de Paula	498,9	19
São Gabriel	515	17
Soledade	895	19
Tapes	462,5	23
Taquara	330,8	14

Fonte: Valente, (2015).

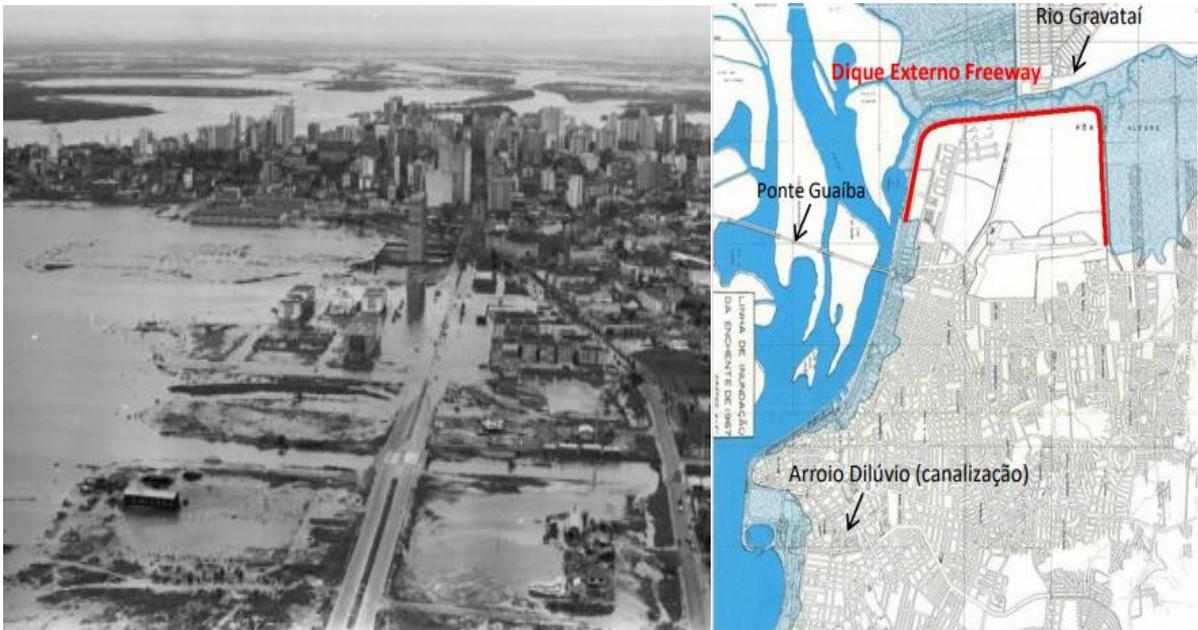
Segundo a Fundação Estadual de Planejamento Metropolitano e Regional - METROPLAN (2020), a cota do Rio Guaíba atingiu 4,75 m em relação ao nível do mar, sendo que a cota normal é de 3 m acima do nível do mar. O tempo de retorno desta cheia foi de 370 anos. Depois desse evento de 1941, outros menores, mas de grande impacto, atingiram o município, em 1967 e 2015. As figuras a seguir mostram, respectivamente, as enchentes de 1941, 1967 e 2015, com os mapas de inundação.

Figura 2 - Inundação de 1941, rua do centro da cidade e mapa de inundação, sendo a cota de inundação 4,75m.



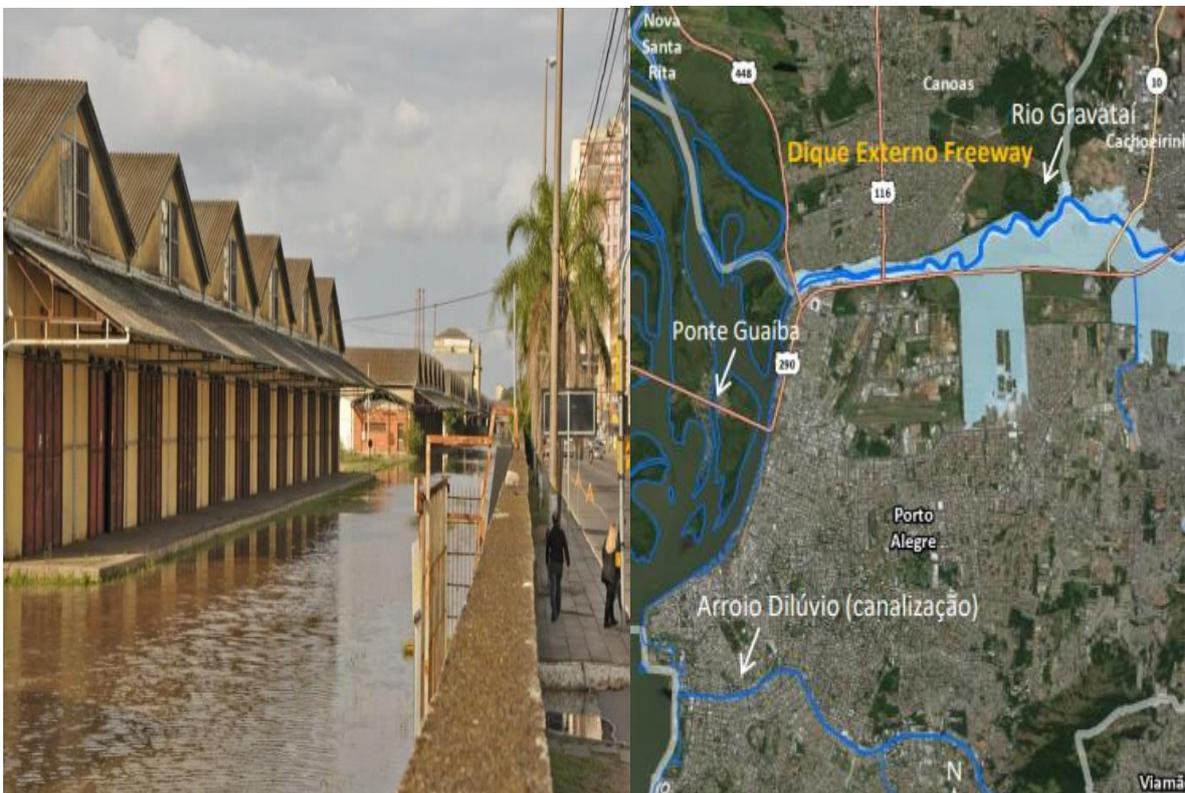
Fonte: Adaptado METROPLAN (2020).

Figura 3 - Inundação de 1967, rua do centro e mapa de inundação, sendo a cota de inundação 3,13 metros.



Fonte: Adaptado METROPLAN (2020).

Figura 4 - Inundação de 2015, dique de proteção centro e mapa de inundação, sendo a cota de inundação 2,94 metros.



Fonte: Adaptado METROPLAN (2020).

2.3.2 Impactos no Sociedade

O escoamento pluvial pode causar inundações nas áreas ribeirinhas e inundações nas cidades devido a urbanização. Esses processos ocorrem quando as águas passam a escoar no leito maior dos rios devido a cheia dos rios. As inundações, nas cidades, tendem a ocorrer devido a eventos de grandes precipitações, quando há impermeabilização em massa e a construção de galerias que aumentam a velocidade de escoamento. As inundações atingem diretamente as populações que ocupam essas áreas naturais de escoamento de cheias. Esse problema acontece muito no Brasil, pelo fato de o Plano Diretor não limitarem o uso das áreas de risco em muitos municípios do país e por ocupação irregular. Essas áreas são ocupadas pela população mais pobre que sofrem constantes perdas devido as situações de moradias irregulares. (TUCCI, 2003 apud BRESSIANI, 2010).

A maior parte das áreas, sujeitas a inundações, são ocupadas de forma irregular. Pois, as áreas regulamentadas, são, geralmente, destinadas a ocupação de áreas públicas. Esse processo de ocupação de áreas de risco, acontece devido a famílias que não possuem recursos suficientes para adquirirem moradias em locais seguros. Assim, mesmo sabendo dos possíveis riscos, as pessoas se tornam sujeitas a ficar no local impróprio e tendo prejuízos a cada inundação, o que piora suas condições financeiras e conseqüentemente, diminui a capacidade de adquirir um outro local. (PAZ, 2004). Segundo Gorel e Kobiyama (2014), são poucos os locais que possuem sistemas de alertas de perigos relacionados a inundações. As pessoas que moram em áreas de riscos, não recebem treinamento sobre como agir em momentos de inundações. Existem políticas públicas que exigem dos municípios a elaboração de mapas de riscos, como, a Política de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC). Pois, como o conhecimento de áreas de riscos é uma medida de controle não-estrutural, que tem como finalidade, tomar decisões tanto em momento de riscos como de caráter preventivo. Para elaboração de mapas é necessário um conhecimento da quantificação de vulnerabilidade, perigo e risco que envolve as regiões de estudo e assim definir as ações a serem tomadas mediante esses eventos. (KOBİYAMA *et al*, 2016). Assim, medidas de controle começaram a ser adotadas para proteção de áreas ribeirinhas. Essas medidas podem ser estruturais e não-estruturais.

2.4 Medidas de Controle

As medidas de controle são definidas como estruturais e não-estruturais. São tomadas como prevenção e proteção de danos diante da ocorrência de inundações. As estruturais são obras de engenharia, quando há modificação no rio. As não-estruturais são medidas que promovem a convivências com os problemas, mas que minimizam os danos. (SANTOS, 2007). A convivência com as inundações é possível mediante o seu controle, o que pode ser desenvolvido através da adoção de medidas estruturais e não-estruturais, e, assim, permite que as regiões ribeirinhas convivem com as situações de cheias, minimizem os riscos e mantenham suas habitações próximas aos rios. (TUCCI; BERTONI, 2003). As medidas não podem ser tomadas como capazes de fornecer total controle ao processo de inundação. Essas medidas devem ser vistas como medidas que minimizam os danos da inundação. Para maior eficiência deve ser adotada as medidas estruturais e não-estruturais de forma conjunta. Isso promove aos habitantes de áreas ribeirinhas o convívio com o rio, pois para essas regiões, é de fundamental importância assegurar a integridade humana e de bens. (REZENDE; TUCCI, 1979 apud BARBOSA, 2006).

2.4.1 Medidas não-estruturais

As medidas não-estruturais são definidas como capazes de dar proteção à comunidade local, ela propõe uma melhor vivência com os eventos de cheias, pois, as medidas não-estruturais, tem maior eficiência, quando o poder público que gerência o sistema consegue trabalhar junto com a sociedade atendida pelo programa de proteção. (JUSTINO, 2019).

As medidas estruturais não são totalmente seguras, uma vez que não se pode prever as intensidades das maiores cheias, ou até mesmo erros de construção. Diante dessa situação seria necessário investimentos muito grande para super dimensionar essas estruturas. Dessa forma as medidas estruturais promovem uma falsa sensação de segurança, o que pode resultar em desastres. As medidas não-estruturais podem ser muito eficientes e são desenvolvidas com menor custos do que medidas estruturais para cobrir uma mesma área de proteção. (TUCCI; BERTONI, 2003).

Segundo Tucci e Bertoni (2003), uma boa forma de trabalhar com as inundações é adotar o uso conjunto de medidas de controles estruturais e não-estruturais, o que permite melhor convivência da população com os rios.

2.4.2 Medidas estruturais

As medidas estruturais são definidas como obras de engenharia e são construídas para diminuir os riscos das inundações. Podem ser extensivas ou intensivas. Sendo as extensivas medidas que visam modificar o escoamento na bacia, alterando as características no solo ou da vegetação e que proporciona um escoamento mais lento. As medidas intensivas são definidas como três tipos e alteram o escoamento natural dos rios, podem ser definidas como: As que aceleram o escoamento, as que retardam o escoamento e as que desviam o escoamento. (TUCCI; BERTONI, 2003).

Nem sempre as medidas estruturais são as mais indicadas para determinada situação. O Brasil é um país que adotou essa medida no combate a inundações em maior ênfase em relação às não-estruturais. O que põe em risco ou compromete as áreas a jusante, pois o problema pode acabar sendo transferido para outra região e gerar novas situações de risco. (BARBOSA, 2006 apud JUSTINO,2019).

2.4.2.1 Diques

Algumas cidades tiveram sua origem perto dos rios para fazer uso dos seus recursos ou por serem áreas de menor custo e até mesmo áreas ocupadas irregular. As áreas de inundações também são ocupadas por diversos fatores sociais e, um deles, ocorre quando os eventos de inundações não se repetem ao longo dos anos. Nesse caso, a não recorrências do evento pode gerar a sensação de segurança e faz com que pessoas se sintam seguras. No município de Blumenau/SC, a população começou a ocupar as áreas de risco devido ao longo tempo sem eventos de cheia, 1912-1982, mesmo que antes, havia registros de inundações das áreas ocupadas. Assim, na enchente de 1983, como as áreas de planícies de inundação estavam ocupadas, houve grandes prejuízos no Município. Em Porto Alegre/RS, devido à grande enchente de 1941, que atingiu o centro e algumas áreas ribeirinhas da cidade, foi construído um sistema de dique de proteção. Hoje é motivo de debates

se é necessário manter essa medida estrutural de proteção, mediante não ter se repetido tal evento de inundação. Devido esses eventos de inundações ocorrerem em diversas cidades e gerarem muitos danos aos ocupantes e às áreas de risco, medidas de proteção são discutidas pelos administradores públicos. Por motivos de poucos recursos financeiros para transferir as pessoas para lugares seguros, e até mesmo por possível reocupação da área por outras famílias, sistemas de proteção estruturais são mais viáveis para solucionar o problema. Tais estruturas são canalizações, diques, barragens etc. (TUCCI, 2003).

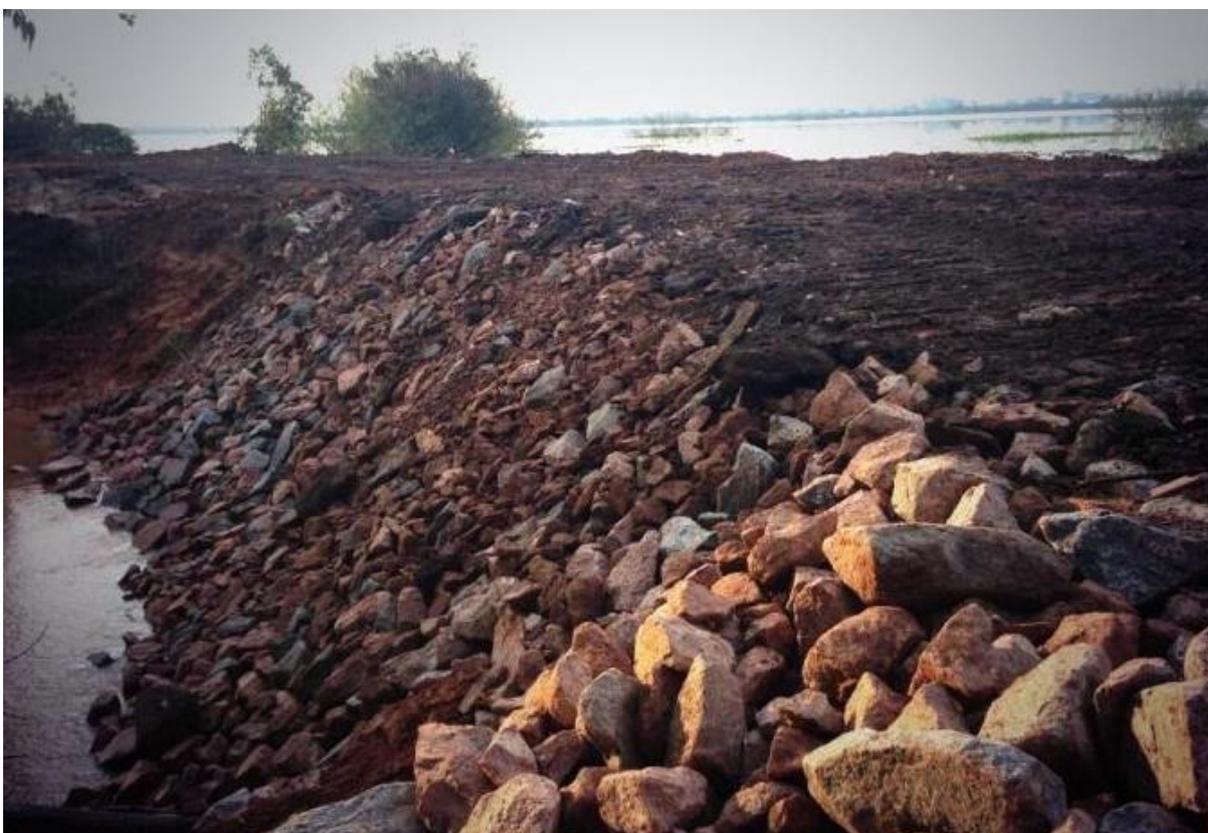
Diques são estruturas construídas próxima as margens dos rios com função de proteger as áreas ribeirinhas de extravasamento de enchentes. Com a finalidade de evitar o extravasamento do rio, mas também promovem a elevação da cota natural de cheia e conseqüentemente o aumento da velocidade de escoamento, o que causa erosões nas margens e problemas a jusante. (TUCCI, 2003). Ainda, segundo o autor, os diques apresentam riscos quanto a possibilidade de rompimento ou colapso e a definição de cota de extravasamento, o que pode causar danos muito grandes. Estas estruturas são medidas de controle voltadas, principalmente, para planície de inundação e são mais utilizados de formas intensivas. Geralmente construídos em forma de barras, os diques são estruturas construídas principalmente em concreto ou aterro de solo de forma inclinada. Sua altura é definida em projeto conforme a necessidade e é eficiente para a cota de projeto, uma vez, que, se houver eventos maiores do que as de projeto, perde a capacidade de proteção. (CORDEIROS, MEDEIROS e TERAN, 1999 apud IMPULCETTO, 2017). A eficiência dos diques deve ser dimensionada conforma a sua importância à região que está sendo protegida. Deve ser levado em conta os impactos mediante um possível rompimento ou extravasamento, se os prejuízos serão grandes ou pequenos. Dessa forma, as cotas de projeto de um dique, de proteção às cidades, devem ser dimensionadas para eventos de cheias com probabilidade de ultrapassar a cota de proteção desses diques. (COLLISCHONN; TASSI, 2008). No geral esses tipos de estruturas, tanto diques quanto outras, não oferecem proteção quando ocorrem eventos mais intensos do que são projetadas. Como ocorreu com a passagem do furacão Katrina, em 2005, em Nova Orleans, EUA. (JHA; BLOCK; LAMOND, 2012 apud JUSTINO, 2019). Os diques são dimensionados com probabilidades de falhas e podem ter seu grau de importância de proteção relacionados aos objetos que protegem. Assim, os diques devem ser projetados

conforme a necessidade de manter a segurança local, pois estruturas que protegem grandes cidades devem ser projetadas com maior nível de segurança em relação às que protegem pequenas áreas agrícolas. (COLLISCHONN; TASSI, 2008).

Os diques são medidas estruturais utilizadas em diversos países do mundo. Um exemplo de eficiência do seu uso é a Barreira do Tâmis, no Reino Unido. Obras de medidas estruturais desenvolvidas nesse país tem se mostrado eficiente, pois evitam que uma grande região fique embaixo de água durante às épocas de cheia. (RONDE; MULDER; SPANHOFF, 2003 apud JUSTINO, 2019).

Os diques são estruturas dimensionadas para prover segurança, mas podem apresentar alguma fragilidade quanto a operação, mais no aspecto manutenção e proteção da estrutura. Em agosto de 2013, o dique que protege a zona norte cidade de Porto Alegre, junto ao arroio Feijó, teve uma parte rompida causando alagamento e atingindo 700 casas, sendo as causas do rompimento definida como atitude intencional e foi encaminhada para investigação. (GAÚCHA ZH, 2013)

Imagem 1 - Dique do Município de Porto Alegre/RS



Fonte: Gaúcha ZH (2013).

2.5 Modelagem Hidrodinâmica

A modelagem hidrodinâmica possibilita o estudo com água e seu comportamento seja em corpos naturais ou artificiais sendo de grande importância para planejamentos de eventos desconhecidos.

A modelagem hidrodinâmica utiliza um conjunto de equações de Saint-Venant de forma completa ou simplificada para representar o escoamento não-permanente em um canal livre. (CHOW, 1959 apud CHAGAS, 2009). Através de modelos hidrodinâmicos é possível realizar cálculos de ondas de cheias em rios, sendo desenvolvido através das equações de Saint-Venant. Assim modelos hidrodinâmicos são capazes de demonstrar, de forma eficiente, os efeitos de amortecimento, translação e efeitos de jusante, sendo possível mapear a planície de inundação e a propagação da onda de cheia para as vazões de pico. (PONTES; COLLISCHONN, 2014). Cada rio apresenta suas características que influenciam diretamente no escoamento. Diversos fatores são responsáveis pelas características do deslocamento da onda de cheia em um canal, sendo eles: o atrito com a margem e o fundo, as diversas formas e variações físicas do canal, o armazenamento e ocupação da planície de inundação. Esse deslocamento com suas variações pode ser representado pela equação da continuidade e pela conservação da quantidade de movimento. (LOU, 2010). Conforme Chagas (2009), essas equações definem a modelagem hidrodinâmica em condutos livres naturais e ou artificiais. A equação da continuidade define o escoamento ao longo do curso de água, a equação dinâmica representa as forças atuantes na quantidade de movimento no escoamento, sendo as forças de atrito, gravidade e a força da pressão da água sobre a superfície que reduzem a velocidade do escoamento. A seguir é apresentado as equações de continuidade (8) e dinâmica (9):

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = ql \quad (8)$$

Equação dinâmica:

$$V * \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} = g * (S_o - S_f) \quad (9)$$

Onde:

S - é a área molhada da seção;

Q - é a vazão;

ql - é a vazão referente a contribuição lateral;

h - é a profundidade;

g - é a aceleração da gravidade;

So - é o a declividade da calha fluvial;

Sf - é a declividade da linha de energia de escoamento.

2.6 HEC-RAS

O Hydraulic Engineering Center – River Analysis System (HEC-RAS 5.07) foi desenvolvido pelo Corpo de Engenharia hidrológica do Exército dos Estados Unidos (USACE) é disponibilizado sem custos ao público. O HEC-RAS foi desenvolvido para realizar simulações de escoamentos permanentes em uma dimensão (1D) e escoamento não-permanentes em uma e duas dimensões (2D). O software ainda é capaz de realizar outras funções de análise de comportamento como: cálculo de transporte de sedimentos e modelagem de qualidade e temperatura da água. O HEC-RAS tem dois conjuntos de equações que podem ser usados para resolver o fluxo que se move sobre a malha computacional, as equações de onda de difusão e as equações de Saint-Venant. (MANUAL HEC-RAS 5.0, 2016).

A modelagem hidrodinâmica possibilita o desenvolvimento de mapas digitais de inundação, e pode servir para determinar áreas com potencial de riscos. O software HEC-RAS tem sido empregado para este tipo de modelagem hidrodinâmica. (SAVAGE et al, 2014 apud CHAFFE et al, 2017). O software pode realizar cálculo dos perfis de água em fluxo permanente gradualmente variável, podendo desenvolver cálculos para os regimes críticos e subcrítico. (LEITÃO, 2018).

2.6.1 Dados de entrada necessários

Os dados de entrada se referem praticamente aos dados referentes às características dos cursos de água e do regime de escoamento. (CHAGAS, 2009). Para o desenvolvimento de modelagem hidrodinâmica através do software HEC-RAS é necessário o uso de dados do local em estudo. A lista a seguir define os critérios necessários para modelagem 2D, conforme o manual HEC-RAS 5.0.7.

- Modelo Digital de Elevação (MDE);

- Coeficiente de Manning;
- Discretização da malha;
- Localização das condições de contorno;
- Hidrograma de entrada;
- Declividade normal à jusante;
- Dimensionalidade (1D ou 2D);
- E discretização temporal.

2.6.2 Topografia do terreno (Modelo Digital de Elevação MDE *raster*)

Modelo digital do terreno (MDT) representa um conjunto de propriedades do terreno através de números. Modelo digital de elevação (MDE) representa apenas as propriedades de elevação do terreno. (COLLINS, 1978, apud CUNHA, 2001). O modelo digital de elevação origina-se da tradução do inglês, *digital elevation model (DEM)*. No Brasil o modelo digital de elevação e o modelo digital do terreno tem sido usado como sinônimos, nos Estados Unidos o modelo digital do terreno é usado como complemento do modelo digital de elevação, sendo este, considerado um dado *raster*. O modelo digital de superfície (MDS) representa outras variáveis que podem variar de forma contínua na superfície do terreno. (BURROUGH, 1986, apud CHAVES, 2002).

2.6.3 Coeficientes Manning

O escoamento em rios e canais aberto se dá com variáveis no tempo e espaço, sendo, praticamente, a vazão, a velocidade e a diferença de nível.

O coeficiente de Manning varia de acordo com a superfície do canal, chamada rugosidade. Conforme aumenta a rugosidade da superfície aumenta-se o coeficiente de Manning e quanto maior este coeficiente, maior o arrasto no escoamento do fluido. (COLLISCHONN; TASSI, 2008). A tabela 4 apresenta alguns valores para o coeficiente de Manning em diferentes superfícies.

Tabela 4 - Coeficiente de Manning para diferentes superfícies

Tipo de revestimento	Manning
Vidro (laboratório)	0,01
Concreto liso	0,012
Canal não revestido com boa manutenção	0,020
Canal natural	0,024 a 0,075
Rio de montanha com leito rochoso	0,075 a >1,00

Fonte: Collischonn; Tassi, (2008).

2.6.4 Equação de Saint-Venant

As equações de Saint-Venant são obtidas através das equações da continuidade e de quantidade de movimento.

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial vx}{\partial x} + \frac{\partial vy}{\partial y} + \frac{\partial vz}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

Equações de quantidade de movimento (Navier-Stokes para fluidos incompressíveis):

$$\frac{\partial vx}{\partial t} + vx \frac{\partial vx}{\partial x} + vy \frac{\partial vx}{\partial y} + vz \frac{\partial vx}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 vx \quad (11)$$

$$\frac{\partial vy}{\partial t} + vx \frac{\partial vy}{\partial x} + vy \frac{\partial vy}{\partial y} + vz \frac{\partial vy}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 vy \quad (12)$$

$$\frac{\partial vz}{\partial t} + vx \frac{\partial vz}{\partial x} + vy \frac{\partial vz}{\partial y} + vz \frac{\partial vz}{\partial z} = gz - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 vz \quad (13)$$

Sendo:

Nas equações 10, 11, 12 e 13, vx , vy e vz são componentes da velocidade ao longo das direções x, y e z respectivamente, em m/s; gz a força da gravidade por unidade de massa ao longo da direção z em m/s²/kg; μ a viscosidade dinâmica, em N.s/m²; p a pressão, em Pa; ∇^2 é o operador de Laplace (equação 14).

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (14)$$

A equação de Saint-Venant é obtida através da integração das equações da quantidade de movimento ao longo da profundidade do corpo de água.

Equações de Saint Venant: Equações 15, 16 e 17.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = A \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - g \frac{\partial(h+z)}{\partial x} \quad (16)$$

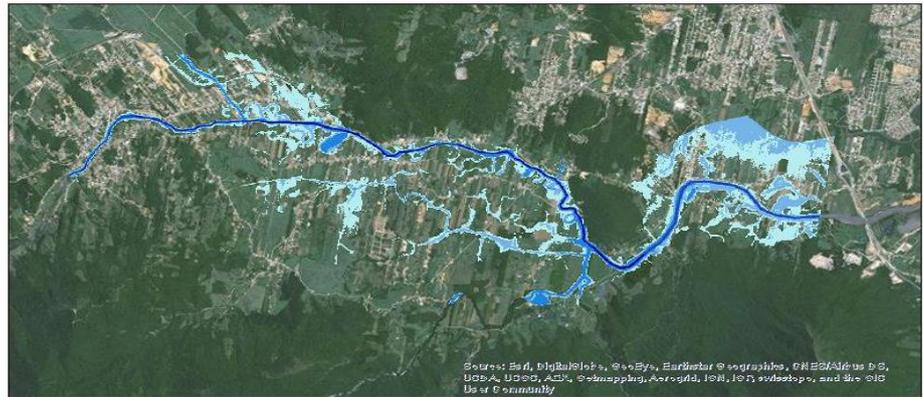
$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = A \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - g \frac{\partial(h+z)}{\partial y} \quad (17)$$

Sendo: u a velocidade média de escoamento ao longo da profundidade na direção do eixo X, em m/s; v a velocidade média de escoamento ao longo da profundidade na direção do eixo Y, em m/s; A um coeficiente de viscosidade, em m²/s; h a profundidade da água, em m; Z a altitude do terreno ou do fundo do corpo de água, em m. (MAGRO, 2018).

2.6.5 Trabalhos desenvolvidos com o uso do HEC-RAS em modelagem hidrodinâmica

O uso do software HEC-RAS tem se mostrado em inúmeros trabalhos de nível acadêmico, e ou profissional como no caso do seguinte trabalho: Modelagem hidráulica de áreas suscetíveis a inundações na bacia hidrográfica do Rio Cubatão Sul, desenvolvido pelos autores: Lucas Mauro Rosa da Luz, Pedro Luiz Borges Chaffe, Gustavo Andrei Speckhann (2017). O estudo analisou a bacia hidrográfica do Rio Cubatão Sul, localizada no Estado de Santa Catarina, nos municípios Águas Mornas, Santo Amaro da imperatriz, Palhoça e São Pedro de Alcântara. Esse estudo utilizou como dados de entrada, informações como, tempo de concentração utilizando a Equação de kirpich, chuva de projeto com tempo de retorno de 20, 50 e 100 anos, Método SCS, metodologia de Blocos Alternados, coeficiente de rugosidade de Manning, hidrogramas unitários, seção transversal do rio no local de estudo. Através desses dados, foram criadas, áreas de modelagem, hidrogramas de cheia, calibração do modelo. Assim, foi obtido o seguinte resultado conforme demonstrado nas figuras 5, 6 e 7.

Figura 5 - Mancha de inundação, tempo de retorno 20 anos



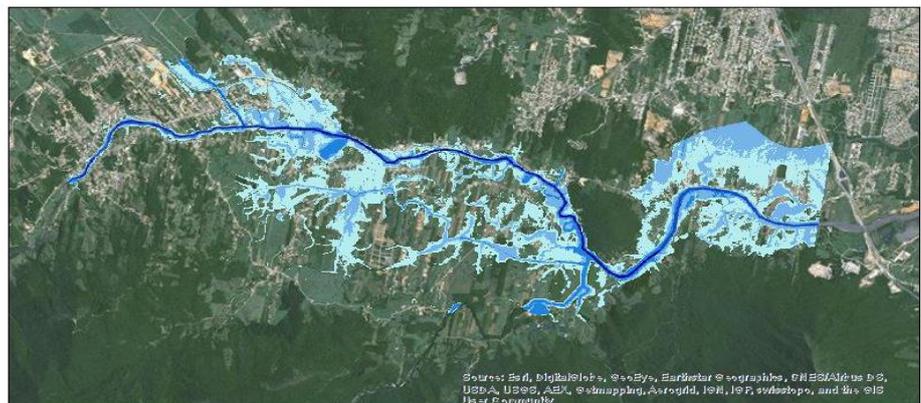
Fonte: Chaffe *et al* (2017).

Figura 6 - Mancha de inundação, tempo de retorno 50 anos



Fonte: Chaffe *et al* (2017).

Figura 7 - Mancha de inundação, tempo de retorno 100 anos



Fonte: Chaffe *et al* (2017).

Conforme Chagas (2009), no Brasil, o HEC-RAS tem sido utilizado em inúmeros trabalhos de modelagem hidrodinâmica como os exemplos citados a

seguir: *Simulação do escoamento de um trecho do Rio Araguaia* (AZEVEDO, 2001). *Simulação para verificação de parâmetros hidráulicos do Canal do Piracema de Complexo do Parque da Barragem da UHE Itaipu* (MULLER et al 2003). *Estudo de propagação de onda de despacho no Rio Paraíba do Sul*, (OLIVEIRA, 2005). *Elaboração de mancha de inundação na área urbana de Itajubá* (SILVA, 2006).

2.7 Medidas públicas de gestão de risco no município de Encantado

No ano de 2012, foi implantada a lei federal número 12.608/12, que institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC). Essa lei, conforme o inciso IV do artigo 6º declara que compete à União apoiar os Estados, o Distrito Federal e os Municípios no mapeamento das áreas de risco. O município de Encantado que apresenta áreas suscetíveis a desastres e nesse contexto se enquadra na Lei. A CPRM recebeu a missão de mapear áreas de riscos relacionadas a possibilidade de acidentes causados por: movimentação de massa, feições erosivas, enchente e inundações. Encantado está entre os 821 municípios que se enquadram na lei 12.608/12, com áreas de risco. A CPRM integra o Plano Nacional de Gerenciamento de Riscos e Resposta ao Desastres Naturais (PNGRRDN), dentre as quatro ações estabelecidas pelo PNGRRDN estão: mapeamento, previsão, respostas e monitoramento. O município de Encantado foi mapeado no período de 20 e 22 de maio de 2019, sendo mapeado quatorze setores de alto e muito alto risco na área urbana. O quadro 2 apresenta a classificação dos graus de risco para enchentes e inundações desenvolvido pela CPRM.

Quadro 2 – Classificação dos graus de risco para enchentes e inundações

Grau de risco	Descrição
R1 Baixo	Drenagem ou compartimentos de drenagem sujeitos a processos com baixo potencial de causar danos. Baixa frequência de ocorrência (sem registros de ocorrências nos últimos cinco anos).
R2 Médio	Drenagem ou compartimentos de drenagem sujeitos a processos com médio potencial de causar danos. Média frequência de ocorrência (registro de uma ocorrência significativa nos últimos cinco anos).
R3 Alto	Drenagem ou compartimentos de drenagem sujeitos a processos com alto potencial de causar danos. Média frequência de ocorrência (registro de uma ocorrência significativa nos últimos cinco anos) e envolvendo moradias de alta vulnerabilidade.
R4 Muito Alto	Drenagem ou compartimentos de drenagem sujeitos a processos com alto potencial de causar danos. Alta frequência de ocorrência (pelo menos três eventos significativos em cinco anos) e envolvendo moradias com alta vulnerabilidade.

Fonte: CPRM, (2019).

A tabela 5 apresenta os setores mapeados pela CPRM e quanto a tipologia do risco. (CPRM, 2020).

Tabela 5 – Síntese dos setores de risco alto e risco muito alto.

Bairro/Distrito	Rua/Avenida	Código do Setor	Tipologia
Barra do Guaporé	Estrada Geral	RS_ENCANTA_SR_01_CPRM	Inundação
São José	Leonel Sangalli	RS_ENCANTA_SR_02_CPRM	Inundação
Lago Azul	Agostinho Costi	RS_ENCANTA_SR_03_CPRM	Inundação
Barra do Jacaré	Agostinho Costi	RS_ENCANTA_SR_04_CPRM	Inundação
Vila Moça	Travessa Farroupilha	RS_ENCANTA_SR_05_CPRM	Inundação
Vila Moça	João Sana	RS_ENCANTA_SR_06_CPRM	Inundação
Vila Moça	Tupanciretã	RS_ENCANTA_SR_07_CPRM	Inundação
Porto Quinze	Tiradentes	RS_ENCANTA_SR_08_CPRM	Inundação
Navegantes	Timbaúva	RS_ENCANTA_SR_09_CPRM	Inundação
Palmas	Avenida da Integração	RS_ENCANTA_SR_10_CPRM	Inundação
São José	David Ceregatti	RS_ENCANTA_SR_11_CPRM	Deslizamento, Queda
Barra do Jacaré	Taquari	RS_ENCANTA_SR_12_CPRM	Deslizamento, Queda
Lageadinho	Estrada Santinha	RS_ENCANTA_SR_13_CPRM	Deslizamento, Queda
Lageadinho	Estrada Santinha	RS_ENCANTA_SR_14_CPRM	Erosão, Deslizamento

Fonte: CPRM, 2020.

A figura 8 apresenta os 14 setores de risco mapeados pela CPRM distribuídos no município de Encantado, sendo do 01 a 10 setores de risco a inundação.

Figura 8 – Setores de risco alto e risco muito alto.



Fonte: CPRM, (2019).

As áreas de risco alto e muito alto foram mapeadas com base na análise de dados coletados em campo e de imagens de satélites. (CPRM, 2019).

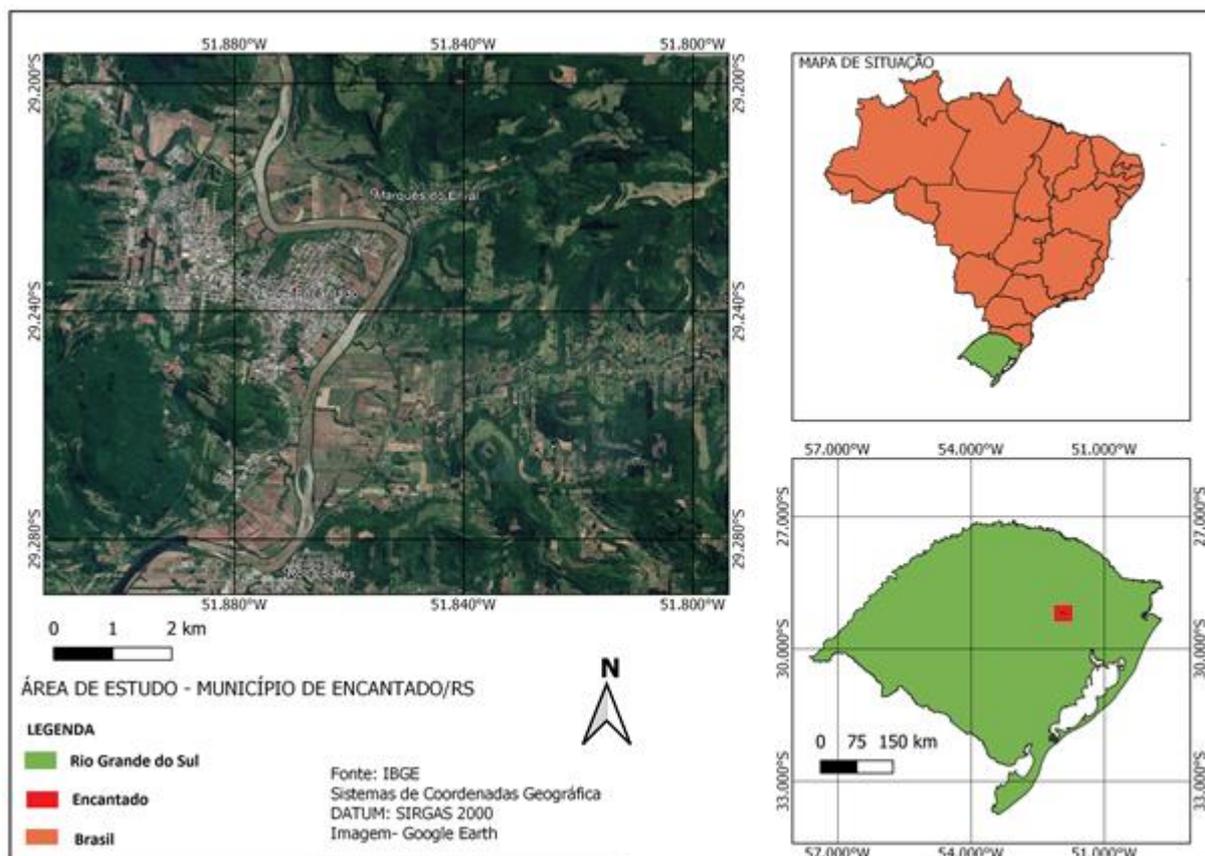
3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se no município de Encantado, Vale do Taquari, centro do estado do Rio Grande do Sul, à margem direita do rio Taquari-Antas, possui uma distância de 140 Km da capital do estado, Porto Alegre.

O município de Encantado possui uma área de 139,16 km² está localizado na região central do Estado do Rio Grande do Sul e tem seu território totalmente inserido na bacia hidrográfica Taquari-Antas. (BRUBACHER *et al.*, 2015, apud QUEVEDO, 2016). Segundo a Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no ano de 2020, o município de Encantado possui uma população estimada em 22.880 habitantes. (IBGE,2020).

O município Encantado/RS foi definido como a área de estudo por estar numa região que sofre com constantes problemas de inundações com as cheias do Rio Taquari-Antas, e tem mostrado diversos problemas sociais em relação aos eventos de inundações. O município pertence ao Vale do Taquari, região inserida na bacia hidrográfica Taquari-Antas, que apresenta situações semelhantes. A posição do município dentro da bacia Taquari-Antas, faz com que receba influência de grande parte da bacia, sendo nesse ponto, atingido pela vazão das sub-bacias do rio das Antas, Guaporé, rio Carreiro e rio Jacaré, somando uma área total de 19.212 km². O município é diretamente atingido pelo remanso do rio Jacuí e pela mudança da característica de rio encaixado, à montante do município de Muçum, (rio das Antas) para mais plano, à jusante, (rio Taquari) o que influencia as inundações devido a menor velocidade e profundidade. A partir da confluência do rio Guaporé e o rio Taquari, o relevo se apresenta mais plano, o rio praticamente deixa de ser encaixado e passa a sedimentar a areia trazida da parte mais alta, e, também, devido ao remanso à jusante proporciona a perda da velocidade. (BRUBACHER *et al.*, 2015). A figura 9 mostra a localização do município de Encantado à margem direita do rio.

Figura 9 – Localização da área de estudo

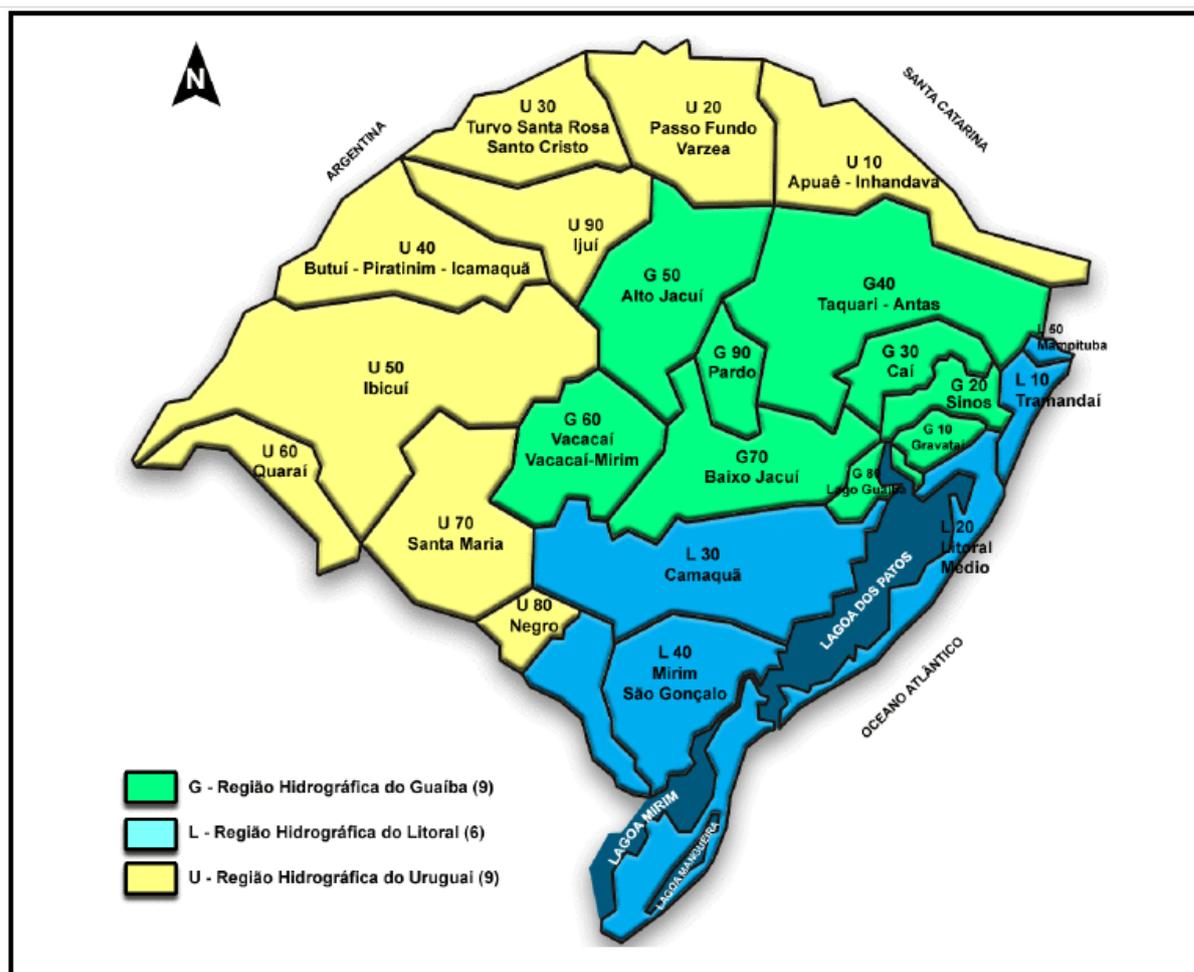


Fonte: Elaborado pelo autor

3.1 Bacia hidrográfica Taquari-Antas

O Estado do Rio Grande do Sul contempla as regiões hidrográficas Uruguai e Atlântico Sul. Dentro da região Atlântico Sul estão as Regiões Hidrográficas Guaíba e Litoral, conforme mostra a figura 10. (PAZ, 2004).

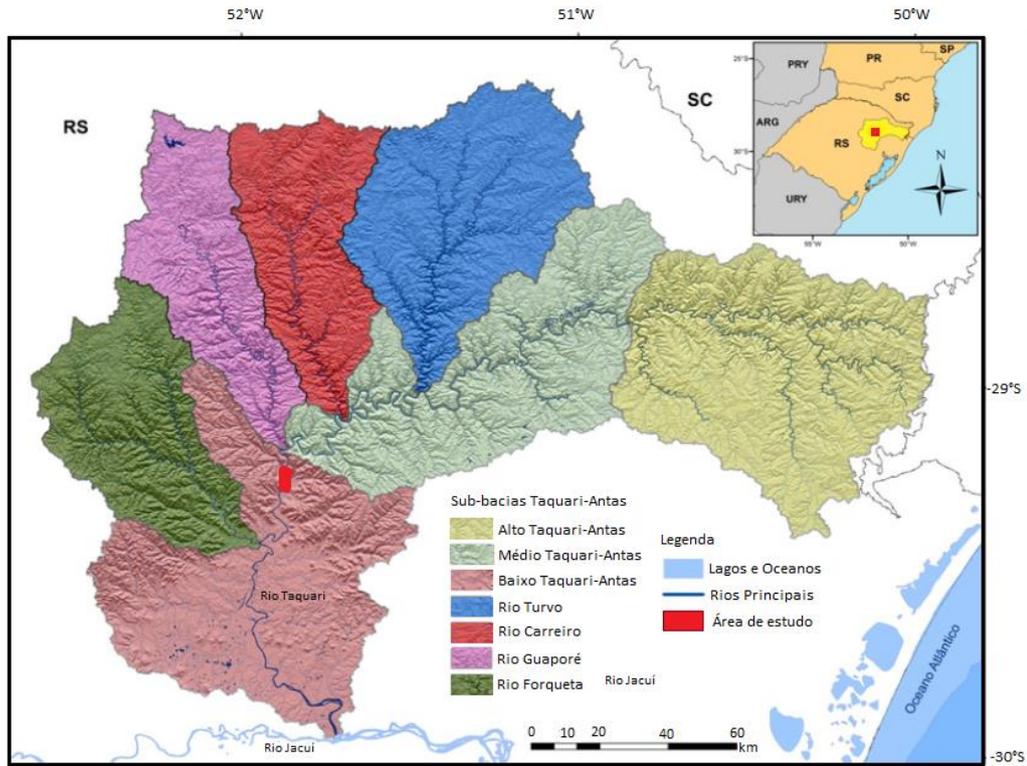
Figura 10 - Regiões Hidrográficas do Rio Grande do Sul



Fonte: Hidrologia Aplicada, (2004).

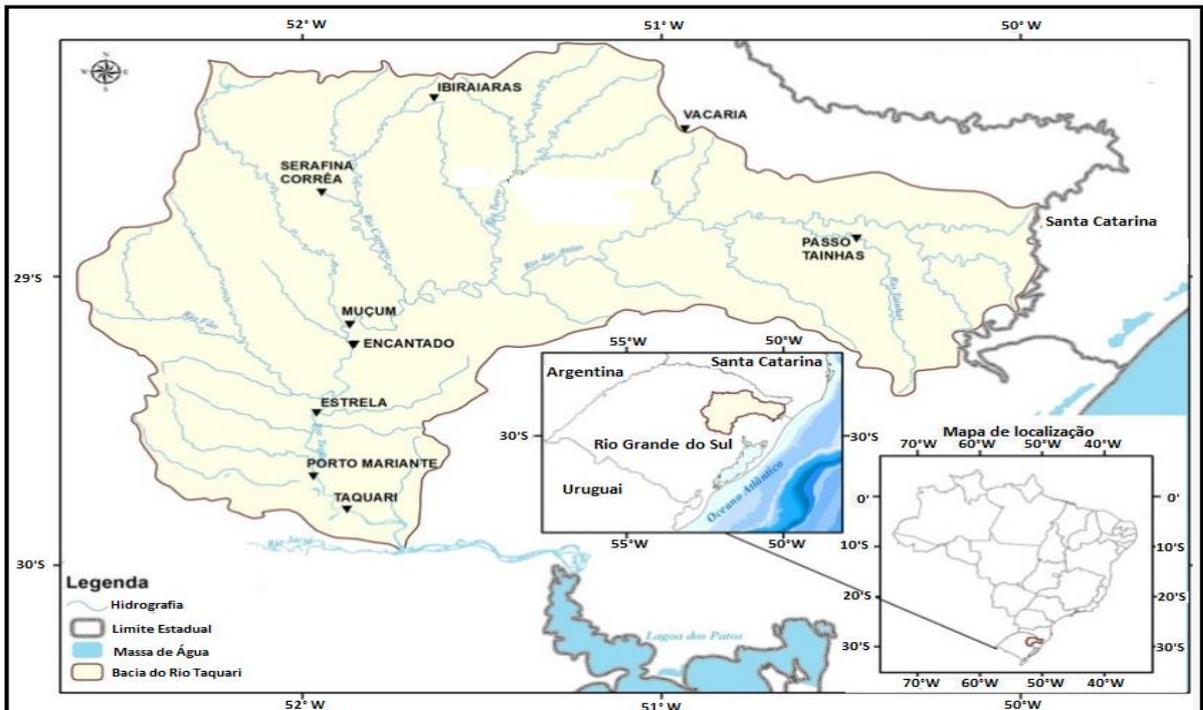
A bacia hidrográfica do sistema Taquari-Antas abrange uma área de 26.428 Km² ao nordeste do Estado do Rio Grande do Sul-BR e pertence a Região Hidrográfica Guaíba. A bacia hidrográfica Taquari-Antas abrange 98 municípios, inseridos parcialmente ou total. O rio Taquari nasce nos municípios de Cambará do Sul, Bom Jesus e São José dos Ausentes, na parte mais alta do estado, região extremo leste do Planalto dos Campos Gerais. É denominado rio das Antas até a confluência do rio Carreiro, junto ao município de São Valentim do Sul. A partir desse local passa a se chamar Taquari e desemboca no rio Jacuí no município de Triunfo. Os principais afluentes do rio Taquari são os rios Camisas, Tainhas e Lajeado (à esquerda), Quebra-Dentes, Da Prata, Carreiro, Guaporé, Forqueta e Taquari-Mirim (à direita) conforme mostra a figura 11 e a figura 12 que mostra a localização das bacias Taquari-Antas. (FEPAM, 2020).

Figura 11 – Bacia hidrográfica Taquari-Antas e localização área de estudo



Fonte: Adaptado Melati e Marcuzzo, (2015).

Figura 12 – Localização da bacia Taquari-Antas.



Fonte: Adaptado CPRM-SACE, (2020).

3.1.2 Características geomorfológicas e hidrológicas da bacia Taquari-Antas

Segundo a Fundação Estadual de Proteção Ambiental (FEPAM) as características físicas da bacia definem o escoamento com grandes flutuações de vazões subsequentes a chuvas contínuas que ocorrem em grandes áreas da bacia. A bacia hidrográfica Taquari-Antas apresenta escoamento superficial rápido devido às declividades de médias a elevadas, baixa cobertura e baixa permeabilidade do solo. As vazões máximas, média e mínimas registradas no município de Muçum, próximo à área de estudo, período de 1940 a 1982 foram: 10300m³/s, 321m³/s e 10 a 20 m³/s, respectivamente. A grande variação de vazões ocorre devido à grande extensão da bacia e de chuvas intensas localizadas em grandes áreas da bacia, o que concentra grandes volumes que se propagam em grande velocidade rio abaixo.

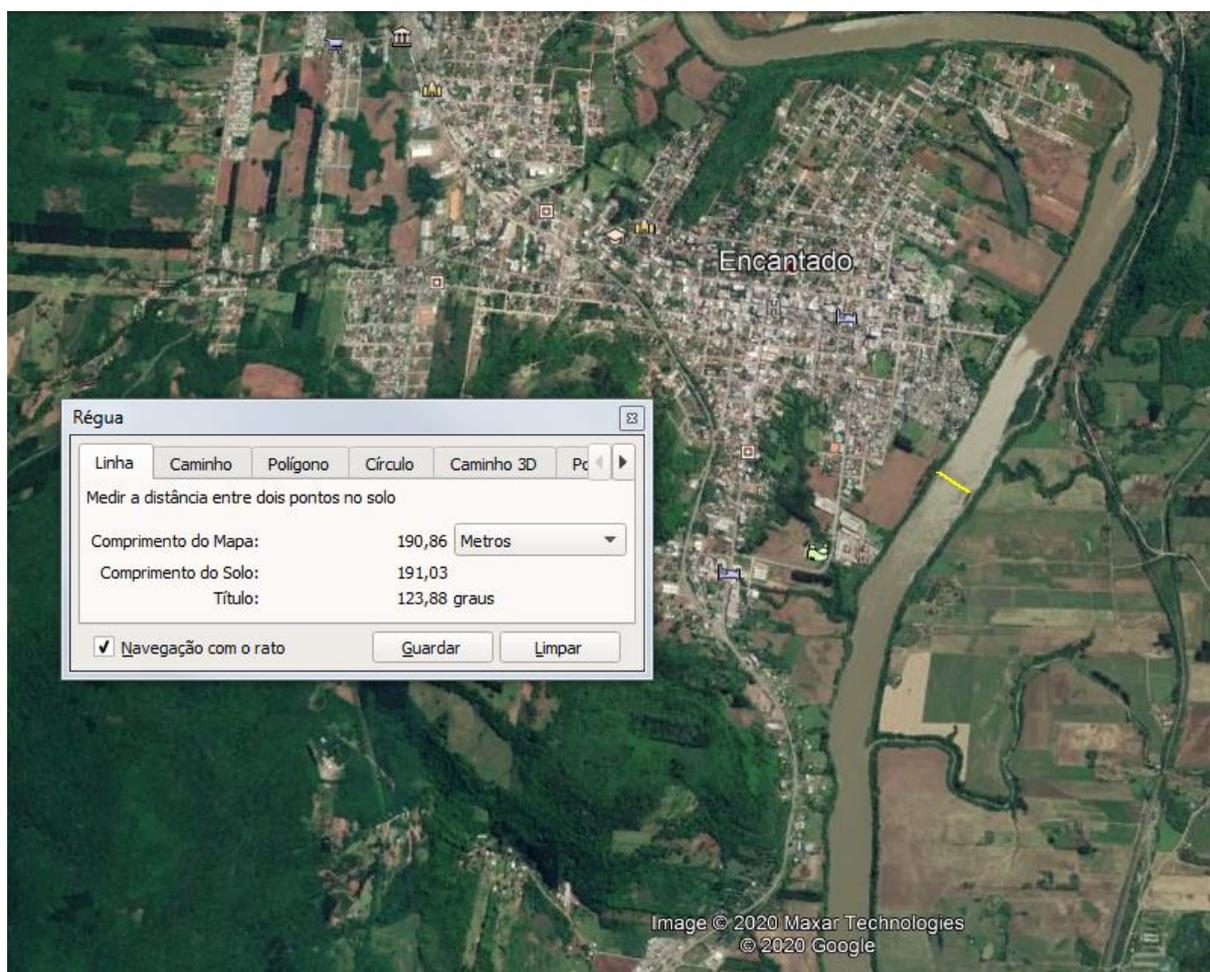
Ainda conforme a FEPAM (2020), as características geomorfológicas dividem a bacia Taquari-Antas em três partes:

- A primeira está localizada entre as nascentes do rio e a foz do rio Quebra-Dentes, direção leste-oeste, trecho com extensão de 183 km, onde apresenta o rio bem encaixado e muitas corredeiras com declividade média de 4,8m/km;
- A segunda está localizada entre a foz do rio Quebra-Dentes e a foz do rio Guaporé, direção nordeste-sudeste, trecho com extensão com 207km onde apresenta as declividades menores, ainda apresenta vales encaixados e corredeiras, mas com menor declividade 1,6 m/km;
- A terceira parte, que compreende a área de estudo do trabalho, está localizada da foz do rio Guaporé até a confluência do rio Jacuí na direção norte-sul, trecho com 140 km onde apresenta um rio de planície com poucas corredeiras e com declividade média de 0,2 m/km.

A bacia Taquari-Antas apresenta variações muito grandes nos processos hidrológicos. Na região das planícies do rio Taquari as inundações são graduais, com aumento do nível muito rápido, sendo centímetros por hora. Nos afluentes dos seus principais rios, Forqueta, Guaporé e Carreiro o processo se dá em formação de enxurradas com variação do nível da água em metros por horas, devido ao pequeno tempo de concentração dessas sub-bacias. (FERRI e TOGNI, 2012 apud ALVES *et al*, 2018).

A simulação hidrodinâmica desenvolvida neste trabalho compreende o trecho do rio que abrange os limites do município de encantado com as coordenadas do local de entrada ao norte do município: 414907.05 m E, 6767983.08 m S e as coordenadas do local de saída ao sul do município: 415803.58 m E, 6760864.58 m S. A calha do rio apresenta poucas variações de largura, sendo a largura média definida a partir do Google Earth em 190 metros aproximadamente, conforme apresentada na figura 13.

Figura 13 – Largura da calha do rio em metros.



Fonte: Google Earth, (2020).

A profundidade do rio no trecho apresenta variações conforme a variação de chuvas na região. Por ser um rio com grandes variações de cota na região, para garantir a navegação é necessário a construção de barragens como a de Bom Retiro do Sul, que garante um calado de 2,5 metros para navegação até o porto de Estrela. (FEPAM, 2020).

3.2 Histórico de inundações no município de Encantado/RS.

A enchente que atingiu o município de encantado quarta-feira, dia 09 de julho de 2020, foi a maior já registrada em toda a sua história. A imagem 2 demonstra a intensidade, sendo que, o nível nesse evento ficou registrado em 48,04 metros, conforme dados do Sistema de Alerta de Eventos Críticos (SACE). No município de Encantado, a referência de nível (NR) do rio Taquari está na cota 27,77m. (KUREK, 2020). Foram 700 casas atingidas no total, sendo necessário fazer uso de equipes da Defesa Civil, Bombeiros e Brigada Militar no resgate às pessoas que ficaram ilhadas. A tabela 6 mostra o nível máximo das dez maiores inundações do rio Taquari no município de Encantado. (GRUPO A HORA, 2020).

Tabela 6 – Dez maiores inundações ocorridas em Encantado

Data	Nível (m)	Nível de referência (m)
08/07/2020	48,04	27,77
01/10/2001	47,35	27,77
21/10/2011	47,27	27,77
06/05/1941	47,25	27,77
31/05/1990	47,24	27,77
05/04/1956	47,10	27,77
26/10/2008	46,67	27,77
21/07/2001	46,47	27,77
24/09/2007	46,42	27,77
27/09/1954	46,27	27,77

Fonte: Kurek (2012) e Grupo A Hora, (2020).

Imagem 2 - Inundação Encantado/RS, 09 de junho de 2020.



Fonte: Grupo A Hora, (2020).

4 METODOLOGIA

A modelagem hidrodinâmica dos eventos de cheia do rio Taquari-Antas foi desenvolvida com o software HEC-RAS, sendo realizada uma simulação para regime não permanente 2D.

4.1 HEC-RAS

Para o desenvolvimento do estudo e gerar as manchas de inundação, foi adotado o programa HEC-RAS 5.0.7.

Neste trabalho foi utilizado somente a simulação 2D com o uso de um pré-processador de área de fluxo 2D, sendo as células processadas de face a face em tabelas de propriedades hidráulicas detalhadas com base nos dados do terreno.

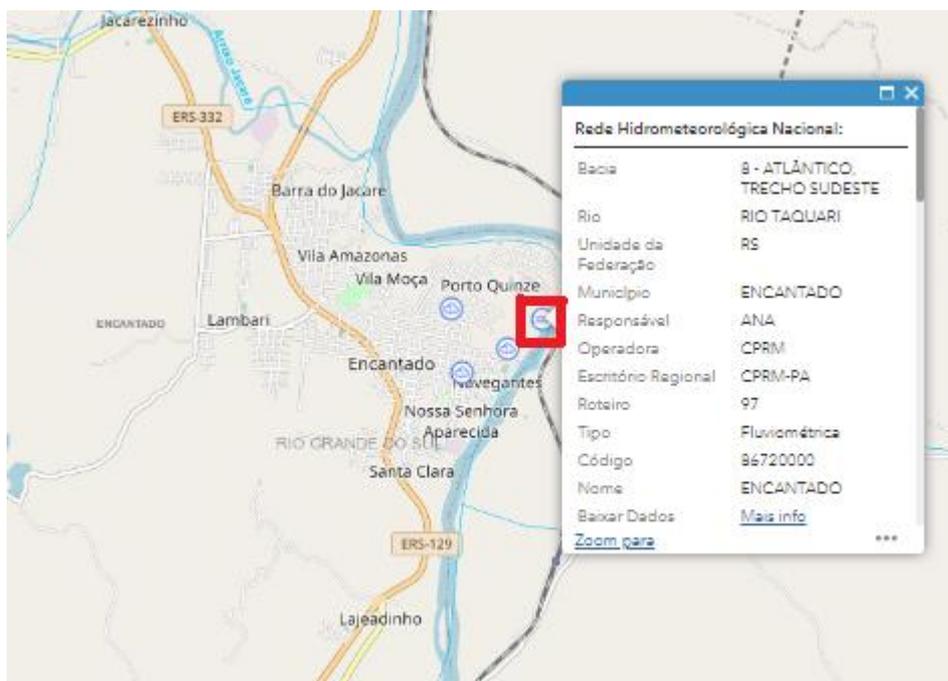
4.2 Dados de entrada utilizados

- Dados de vazões;
- Hidrograma de entrada;
- Coeficiente de rugosidade de Manning;
- Modelo Digital de Elevação (MDE) e arquivo prj (DATUM);
- Tempo de simulação;
- Discretização da malha;
- Equação de Saint-Venant;
- Condições de contorno;
- Declividade normal à jusante;
- Dimensionalidade.

4.2.1 Dados da estação fluviométrica

Foram utilizados os dados das séries históricas das vazões registradas pela estação fluviométrica de Encantado (código 86720000), localizada no trecho do rio junto ao município, conforme a figura 14.

Figura 14 – Localização da estação fluviométrica 86720000 de Encantado/RS



Fonte: HIDROWEB, (2020).

A través dos dados da série histórica pode-se obter o hidrograma de entrada, sendo os dados fornecidos pelo Portal Hidroweb, uma ferramenta integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH).

Os dados das estações fornecidos pelo Portal Hidroweb, são disponibilizados em formato Arquivo Access (MDB), Arquivo Texto (TXT) e Arquivo Excel (CVS), foi baixado um arquivo em formato texto para poder utilizar o software Super Manejo de Dados. Para obtenção da vazão máxima de cada ano, foram utilizados os dados de medições que abrangem o período 01/10/1941 à 01/01/2020. Para conversão dos dados no formato ASCII-Hidroweb para ASCII-Colunas foi utilizado o software Super Manejo de Dados, pois além de facilitar que se trabalhe com grandes quantidades de dados, possibilita a visualização da disponibilidade temporal dos dados. Com o uso do programa Microsoft Excel 2010, onde pode-se obter as vazões máximas de cada ano e, assim, através da Distribuição de Gumbel, estimar as vazões para os tempos de retornos adotados no trabalho. A tabela 7 mostra os dados das vazões obtidos da estação fluviométrica de Encantado. A tabela 8 mostra os TRs, a vazão máxima, a vazão média e o desvio padrão, obtidas a partir das vazões máximas anuais. Sendo que a vazão máxima registrada nesse período foi no dia 21/07/2011. O rio Taquari-Antas presente, ainda, a vazão média próximo a área de estudo em 321 m³/s, conforme as medições realizadas pela estação.

Tabela 7 – Vazões máximas anuais obtidos da estação 86720000 Encantado, sem computar os anos com falhas

Ano	Vazão máxima (m³/s)	Ano	Vazão máxima (m³/s)
1941	6019.70	1992	12126.50
1942	6541.74	1993	6853.89
1943	2792.88	1994	4236.86
1944	5154.77	1995	2792.88
1945	3696.98	1996	3647.37
1946	10854.87	1997	12204.95
1947	2856.98	1983	8990.34
1948	4930.76	1984	5731.30
1949	3732.56	1985	4547.98
1950	10166.10	1986	5162.84
1951	3500.11	1987	5605.79
1952	1933.41	1988	10072.09
1953	6436.01	1989	12713.90
1954	10962.36	1990	13253.92
1955	4796.62	1991	5106.45
1956	12965.60	1992	12126.5
1957	4663.90	1993	6853.89
1958	4970.48	1994	4236.86
1959	10124.28	1995	2792.88
1960	6701.58	1996	3647.37
1961	7965.78	1997	12204.95
1962	1218.98	2002	7466.82
1963	6989.36	2003	6541.74
1964	4043.97	2004	2330.18
1965	12543.37	2005	8910.61
1966	6383.39	2006	5203.27
1967	10503.02	2007	10641.10
1968	2560.61	2008	12193.73
1969	2735.68	2009	9342.31
1970	3732.56	2010	6296.05
1983	8990.34	2011	13323.47
1984	5731.30	2012	5066.31
1985	4547.98	2013	9120.47
1986	5162.84	2014	6011.14
1987	5605.79	2015	9464.02
1988	10072.09	2016	10068.30
1989	12713.90	2017	5354.42
1990	13253.92	2018	4538.85
1991	5106.45	2019	2703.79

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 8 – Vazões para cada TR, vazão máxima, vazão média e desvio padrão, das medias anuais

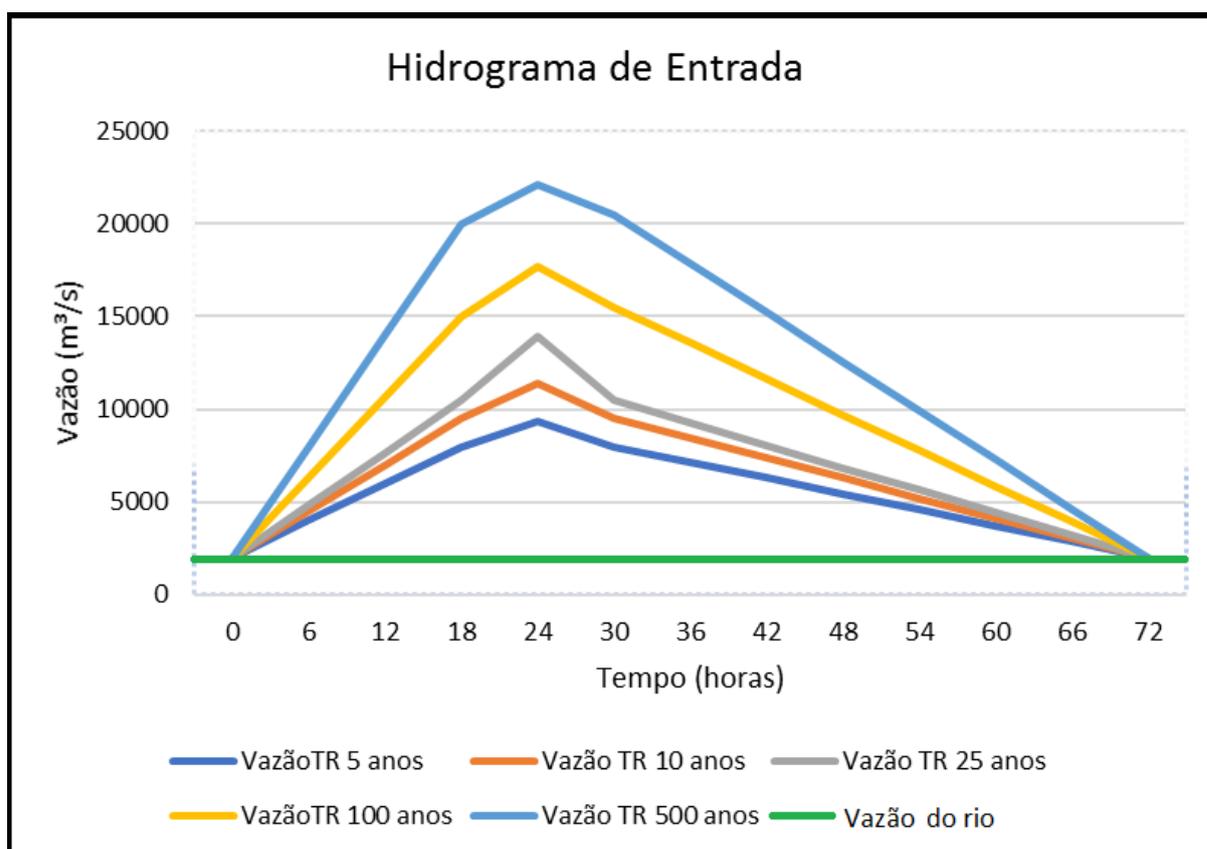
TR	Vazão (m³/s)
TR 5 anos	9367,99
TR 10 anos	11392.03
TR 25 anos	13949.41
TR 100 anos	17729.83
TR 500 anos	22081.62
Máxima	13323.47
Média	6879.04
Desvio padrão	3459.26

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.2 Hidrograma de entrada

O hidrograma de entrada, para cada tempo de retorno, foi desenvolvido com os dados das vazões máximas anuais obtidas na estação fluviométrica de Encantado. O gráfico 1 apresenta o hidrograma de cada TR. A vazão inicial foi estimada em 2000m³/s com a finalidade de criar um cenário mais crítico e possibilitar a verificação da elevação da cota do rio a partir de um evento de cheia, assim, a elevação da cota do rio ocorre em menor tempo, pois a vazão média no local em meses com maiores precipitações fica de 350 – 700 m³/s, conforme os dados da estação fluviométrica de Encantado. O período de 72 horas de simulação, sendo 30 horas para elevação e o restante para escoamento, foi adotado conforme as características das inundações no local. Sendo confirmado que o rio sobe num breve espaço de tempo através do cotograma apresentado para o evento de cheia do ano de 1990, no item 4.2.5.

Gráfico 1 - Hidrogramas para os TRs adotados.

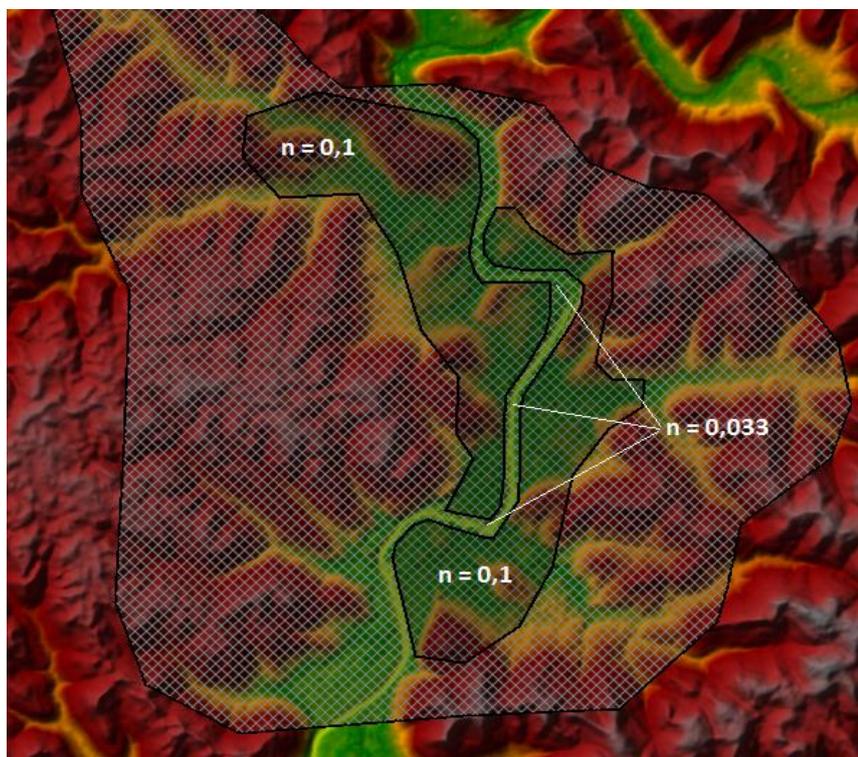


Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.3 Coeficiente de Rugosidade de Manning.

O coeficiente de rugosidade de Manning adotado foi conforme a indicação para canal aberto, 0,024 a 0,075. (COLLISCHONN; TASSI, 2008). Então, para a simulação no rio Taquari, foi adotado 0,033 na calha principal e 0,1 na planície de inundação. A figura 15 demonstra a distribuição do coeficiente de Manning para o leito do rio e a planície de inundação, conforme a distribuição da geometria adotada na simulação.

Figura 15 – Diferentes coeficientes Manning adotados neste trabalho para área de simulação.



Fonte: Elaborado pelo autor

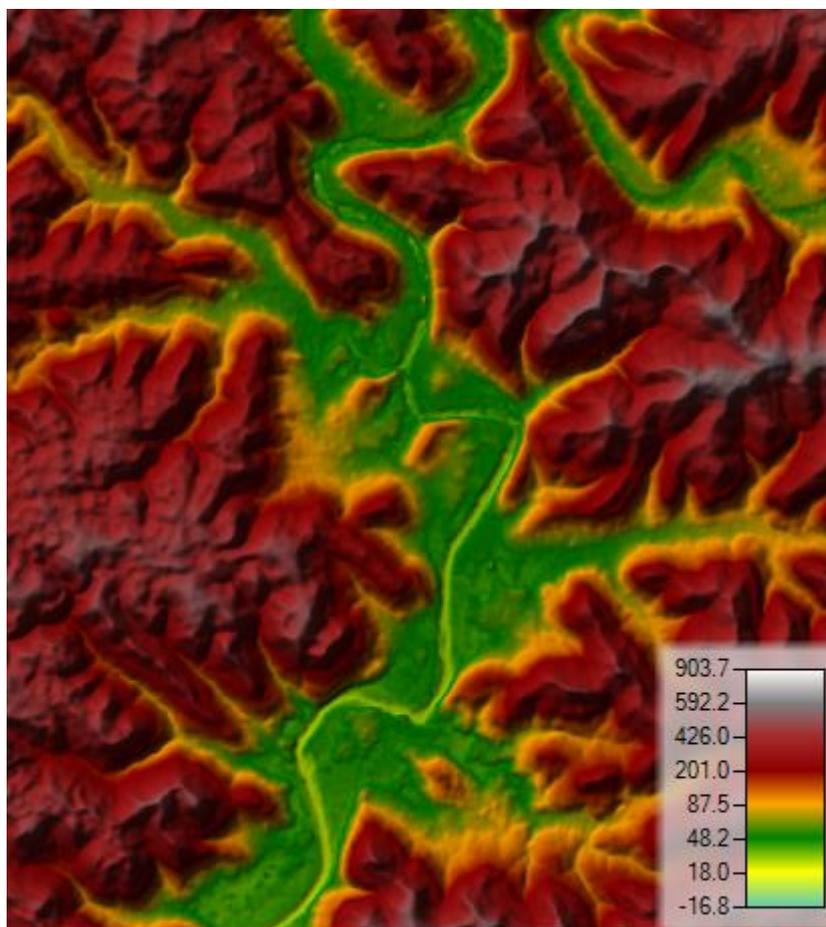
4.2.4 Modelo digital de elevação e área de avaliação

Para realizar a simulação hidráulica é necessário que informações do terreno sejam conhecidas, para isso é utilizado o modelo digital de elevação do local (MDE), pois possui informações geoprocessados com maior resolução espacial. Na simulação deste trabalho foi utilizado o Modelo Digital de Elevação com resolução espacial de 90 metros, disponibilizado pelo Merith Dem. Também é necessário obter a localização da área de estudo o que permite adicionar mapas de localização e de imagens de satélites para uma melhor observação dos resultados. Os modelos de elevação (DEM) são muito eficientes para modelagem de inundações. Os Dem mais precisos possuem resolução de 90m e sem os componentes de erros dos DEMs SRTM e AW3D. (YAMAZAKI *et al.*, 2017).

O HEC-RAS possui a ferramenta *RAS-Mapper* que para desenvolver as simulações necessita de um arquivo com as definições de projeto (*.prj*). Para a área de estudo foi baixado o arquivo da região com a localização do município de

Encantado, no quadrante: 52.000°w, 30.000°s: 50.999°w, 28.999°s, com formato .prj UTM zona 22. A figura 16 apresenta o MDE utilizado neste trabalho.

Figura 16 - Modelo Digital de Elevação (MDE).

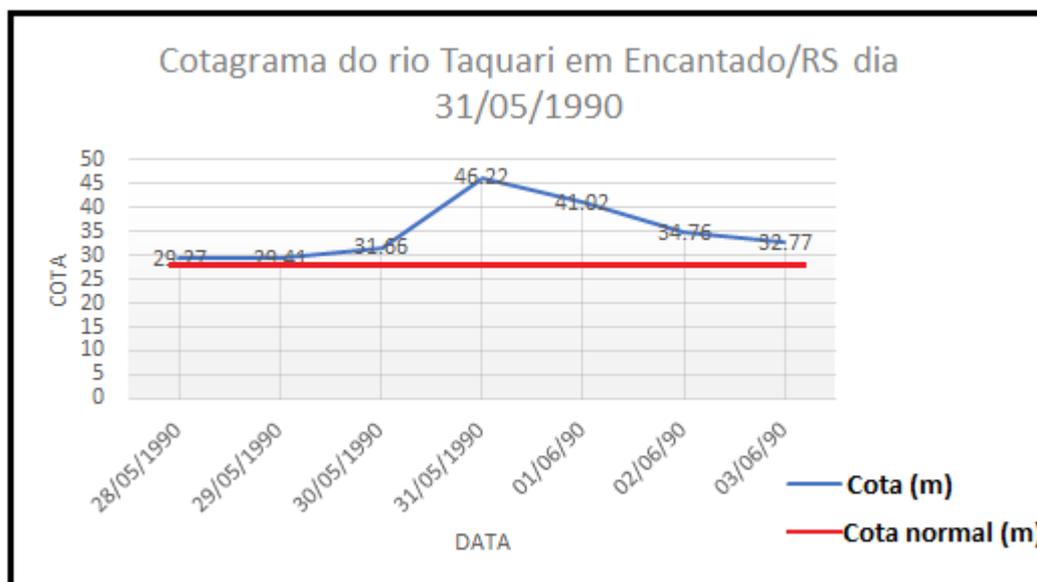


Fonte: Merith Dem, (2020).

4.2.5 Tempo de simulação

O tempo de simulação foi definido com os dados da estação fluviométrica de Encantado, (86720000), pois esta apresenta as vazões e as variações das cotas. Como a vazão máxima registrada em diversos eventos, eleva a cota máxima em aproximadamente 24 horas, foi adotado o tempo de simulação de 72 horas para todos os TRs, sendo: adotado, 30 horas de subida e 42 horas de descida. O cotograma do gráfico 2 gerado pela cheia de 1990, a partir de dados da estação fluviométrica de Encantado, demonstra o tempo de elevação e o tempo de baixa das cotas.

Gráfico 2 – Cotagrama de cheia ocorrida no final de maio de 1990.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.6 Discretização da malha e intervalo de computação (passo de tempo) da simulação

Conforme o Manual HEC-RAS (2016) o software é projetado para trabalhar com malhas computacionais podendo ser malhas estruturadas ou não-estruturadas. As malhas estruturadas possuem as células ortogonais umas às outras e, assim, facilita o cálculo computacional devido a sua geometria com poucas faces. A malha não-estruturada, por possuir mais faces em cada célula, torna o cálculo mais demorado. As células computacionais não exigem um fundo plano, nem faces e bordas precisam ser uma linha reta, pois as células computacionais são baseadas conforme os detalhes do terreno. Ainda conforme o manual, a consistência da malha computacional deve ser testada para intervalos de tempos computacional diferentes. A consistência requer que a redução dos passos de espaço (grade da malha) e de tempo para garantir a convergência de uma solução. Sendo que ao testar diferentes tamanhos de células (ΔX) para malha e diferentes espaços de tempo computacional (ΔT) para cada malha computacional, assim, permite que o usuário avalie como o tamanho da célula e o intervalo computacional interferem nos resultados.

Na simulação deste trabalho foi adotado uma malha de 80x80 metros (ΔX) e o intervalo de tempo computacional (ΔT) adotado foi conforme o número de Courant,

que foi programado para ficar entre 1,0 e 0,5, o que possibilitou um menor tempo de simulação e ainda excelentes resultados.

Para definir o tempo de simulação foi adotado, conforme a possibilidade do software, o tempo de simulação em intervalos de tempos variados, sendo que essa variação de tempo é alterada de forma programada a manter o número de Courant, entre intervalos adotados de 1,0 a 0,5.

Ainda, segundo o manual do HEC-RAS (2016), o software possui dois tipos de equações para desenvolver o fluxo que se move sobre a malha computacional, sendo: as equações de onda de difusão e a equação de Saint-Venant. Como a equação de onda de difusão é mais tolerante que a de Saint-Venant, para a realização da simulação hidrodinâmica deste trabalho, foi utilizada a equação de Saint-Venant. O HEC-RAS usa esquemas numéricos como diferenças finitas que vão discretizar as equações diferenciais parciais como a de Saint-Venant para resolver os cálculos para específicos intervalos de tempo. Então, a discretização temporal é o passo de tempo dividido para a simulação. O intervalo de tempo (ΔT) de cálculo é um parâmetro muito importante, pois, se for usado valores inadequados, pode haver erros numéricos nos resultados. Então, os valores precisam ser suficientemente pequeno para representar a física do problema a serem resolvidos, mas que também não apresentem problemas de erros numéricos. O software apresenta a opção de escolher trabalhar com intervalos de tempos (ΔT) que podem ser adotados manualmente ou através de uma ferramenta de ajuste de intervalo de tempo baseado no número de Courant, sendo adotado que: se durante a simulação, o número de Courant estiver maior do que 1,0, o intervalo de tempo é dividido por 2, se ainda estiver maior do que 1,0, é novamente dividido por dois, sendo possível programar quantas vezes ele pode realizar essa divisão do intervalo de tempo por 2. Essa função também pode funcionar de forma inversa, onde o intervalo de tempo é multiplicado por 2, quando o número de Courant estiver abaixo do programado. Para adotar um número de Courante menor que 1 o software adota a equação 17 ou a 18. Nesta simulação, foi adotado a possibilidade de divisão e multiplicação do número de Courant até por cinco vezes.

A seguir estão as diretrizes para escolher um intervalo de tempo para equação de Saint Venant.

$$C = \frac{V\Delta T}{\Delta X} \leq 1,0 \quad (C \text{ \acute{a}ximo} = 1,3)$$

(17)

ou

$$\Delta T \leq \frac{\Delta X}{V} \text{ (com } C = 1,0) \quad (18)$$

Onde:

C = Número de Courant;

V = Velocidade da onda de inundação;

ΔT = Etapa (s) de tempo computacional (tempo do passo);

ΔX = Tamanho médio da célula.

4.2.6.2 Número de Courant

O número de Courant é definido como uma grandeza escalar do local de domínio do fluido em um volume finito, sendo um parâmetro muito usado em esquemas numéricos dentro de uma simulação hidrodinâmica. Geralmente o número de Courante é adotado como menor que 1,0. (PORTO, SCHULZ e SIMÕES, 2017).

4.2.7 Condições de contorno

As condições de contorno de montante adotadas neste trabalho foram obtidas através da série de vazões obtidas no Portal Hidroweb referente aos dados da estação 86720000 de Encantado. Para cálculo de pico foi utilizado Gumbel, conforme mostrado no item 4.2.1 deste trabalho. O tempo de hidrograma foi calculado com base nas observações de eventos máximos passados. Este hidrograma está representado na figura 12 do item 4.2.2. Para a condição de contorno a Jusante foi utilizada declividade normal, que foi calculada com base nas cotas do MDE do trecho de jusante da simulação, sendo encontrado, no cálculo, o valor de 0,00046m/m.

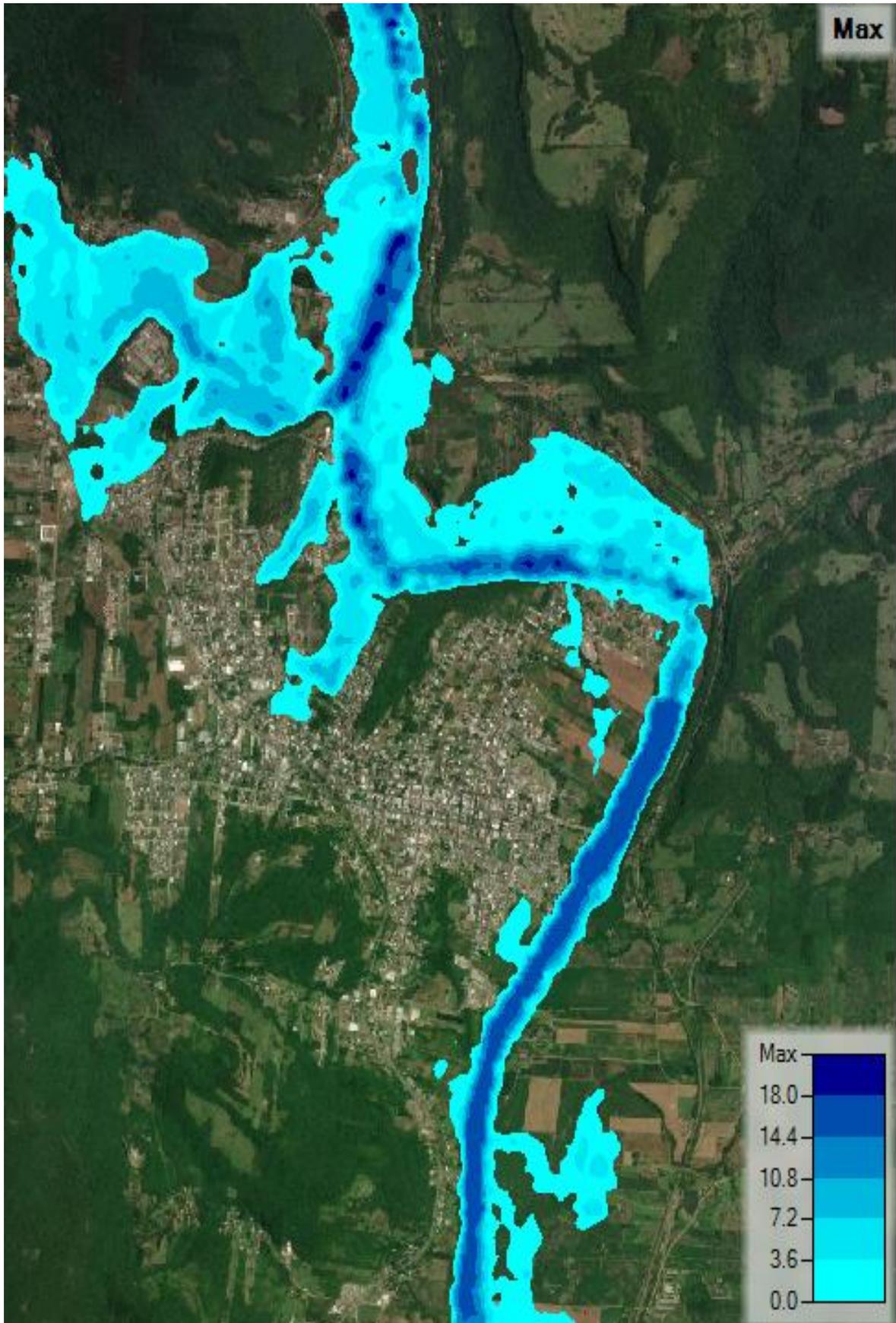
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este estudo teve como objetivo analisar as manchas de inundação para diferentes tempos de retorno no rio Taquari junto ao município de Encantado e, assim, permitir a comparação com as áreas mapeadas no município como zonas de risco às inundações desenvolvidas pelo Sistema de Alerta de Eventos Críticos (SACE) que pertence à Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).

5.1 Mapas de inundação

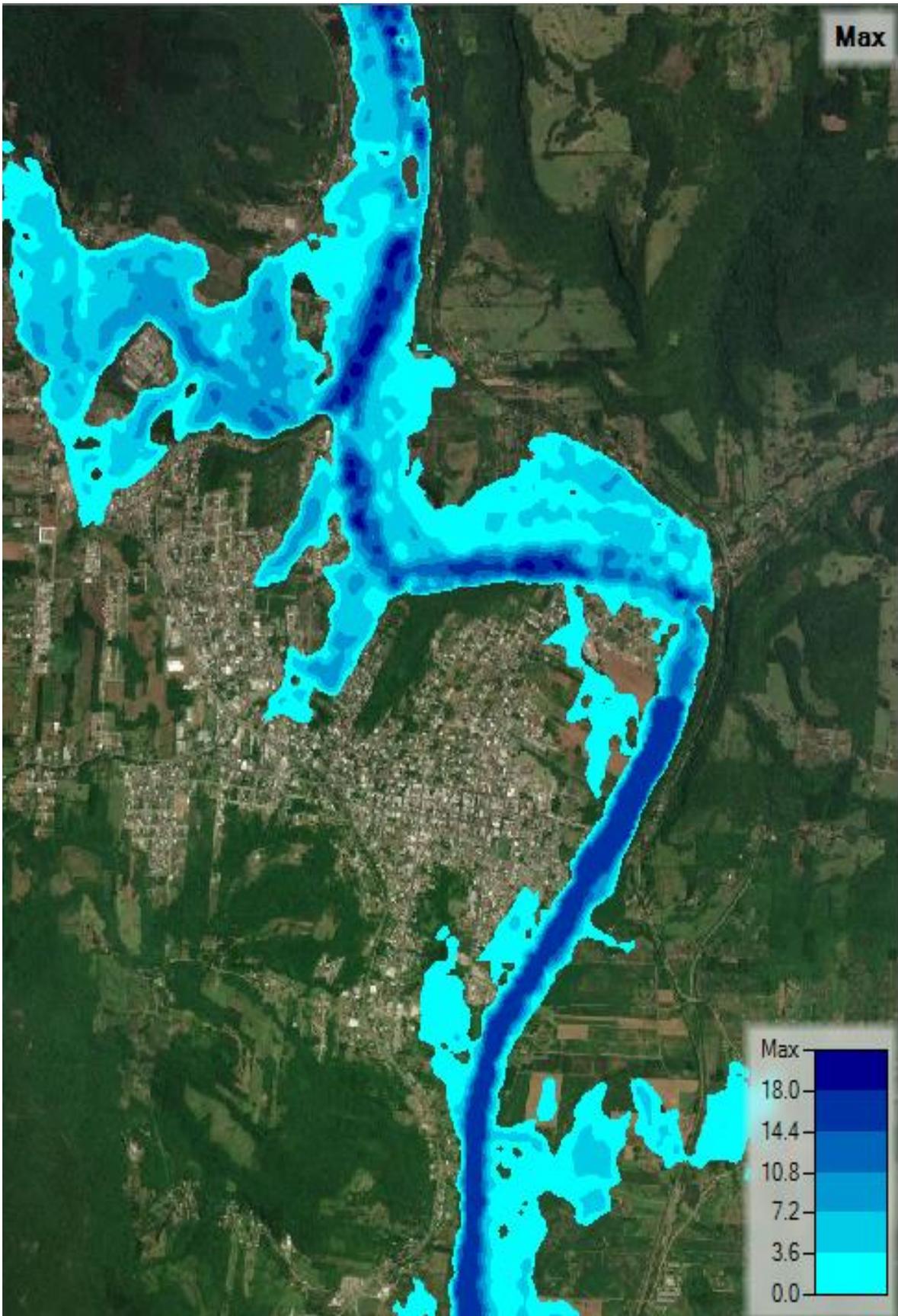
Os mapas de inundação foram obtidos com a modelagem hidrodinâmica realizada em regime não permanente 2D e pode ser representada de forma mais clara com o uso de mapas. Com a sobreposição das manchas de inundação ao Mapa Google Hybrid, foi possível observar a mancha de inundação gerada sobre as áreas habitadas. As figuras a seguir apresentam as manchas de inundação para cada tempo de retorno.

Figura 17 – Mancha de inundação para TR = 5 anos



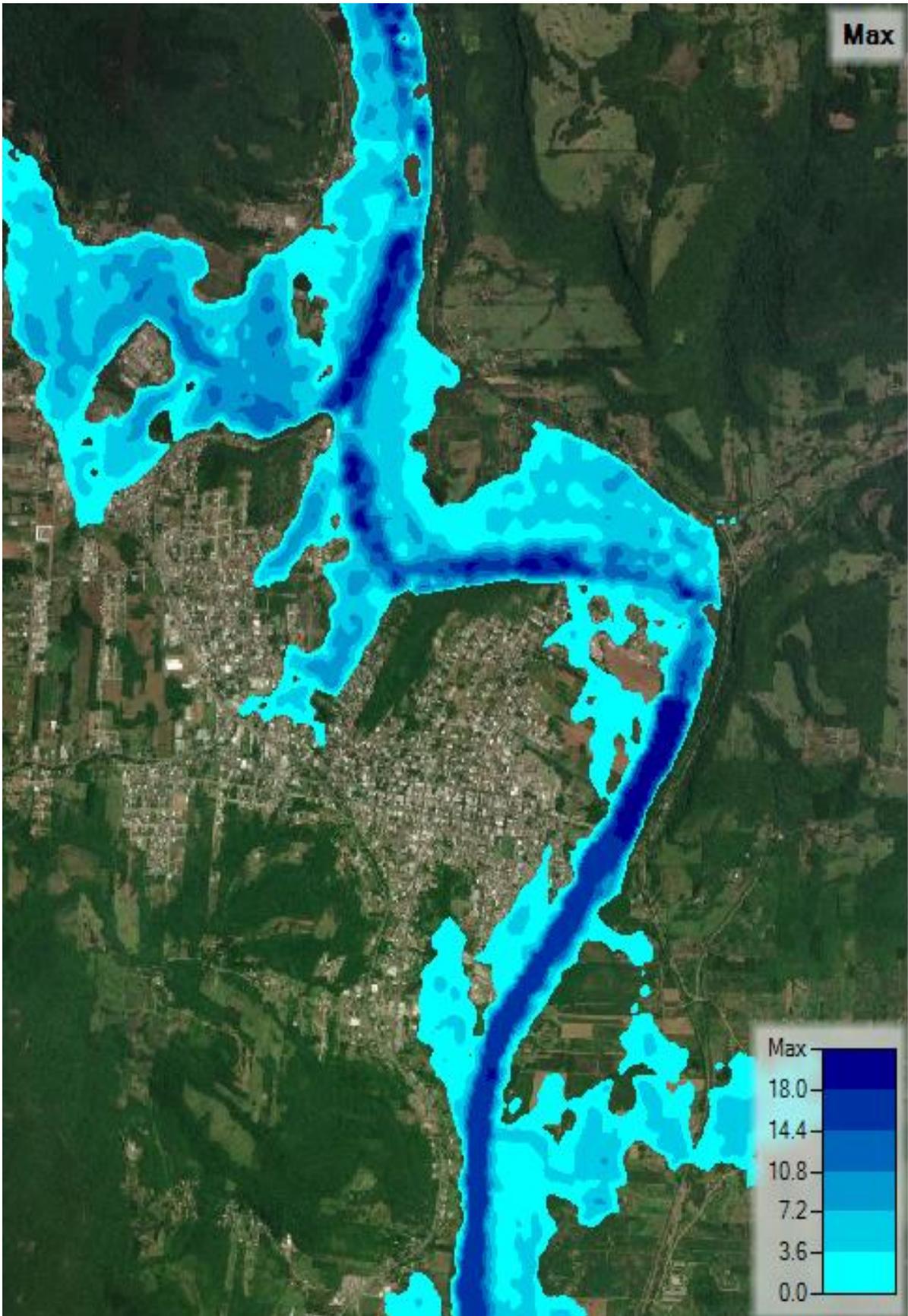
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 18 – Mancha de inundação para TR = 10 anos



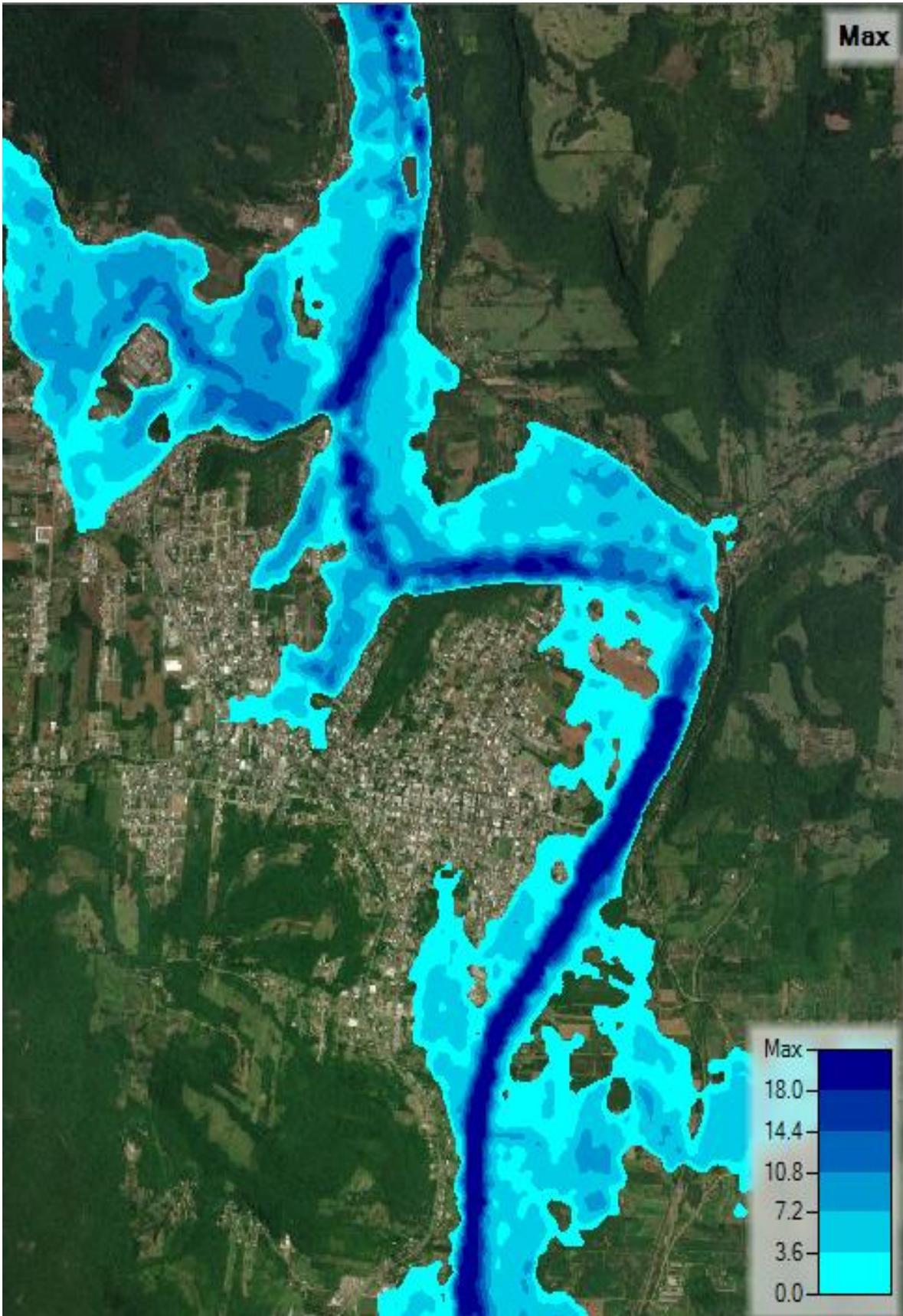
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 19 – Mancha de inundação para TR = 25 anos



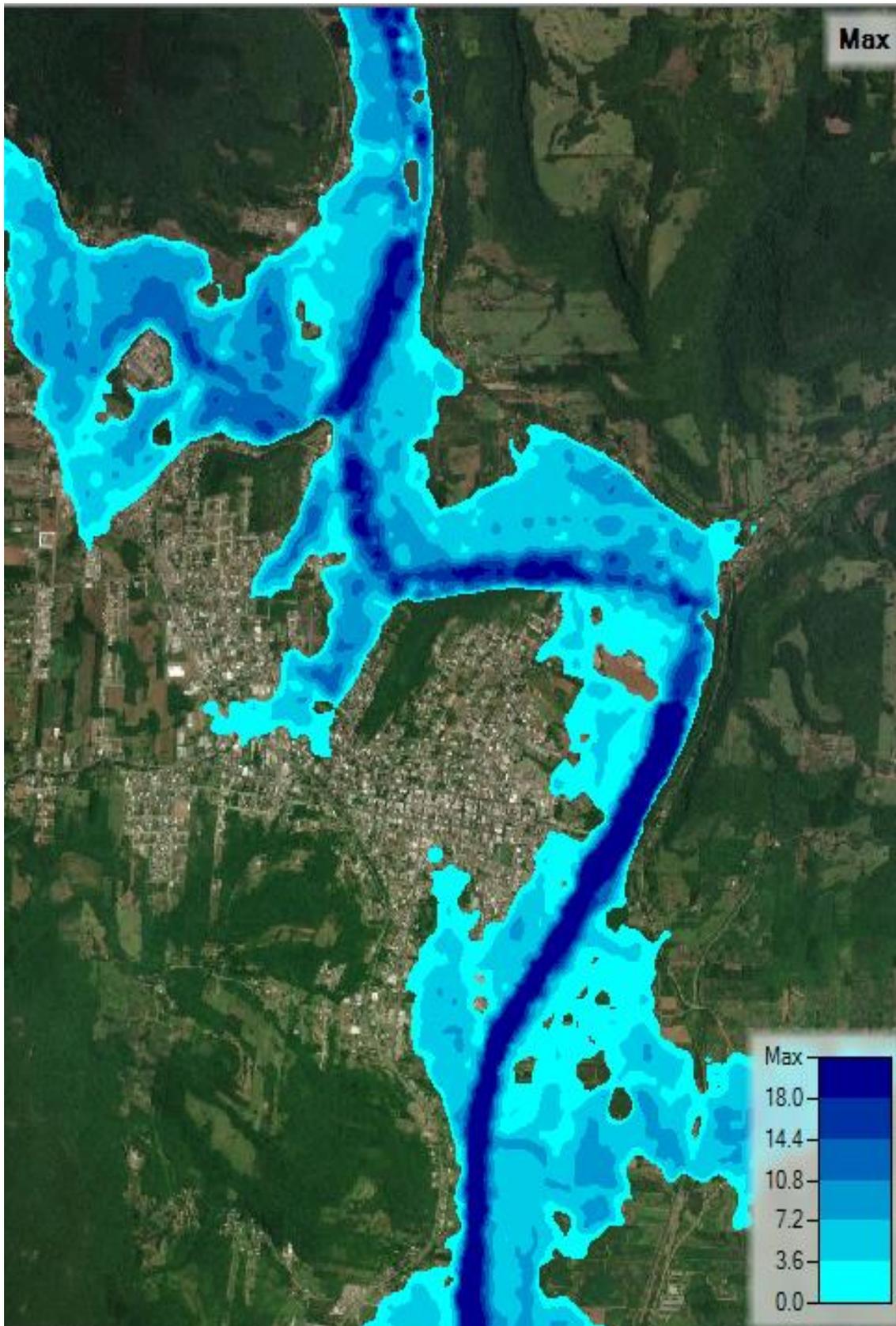
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 20 – Mancha de inundação para TR = 100 anos



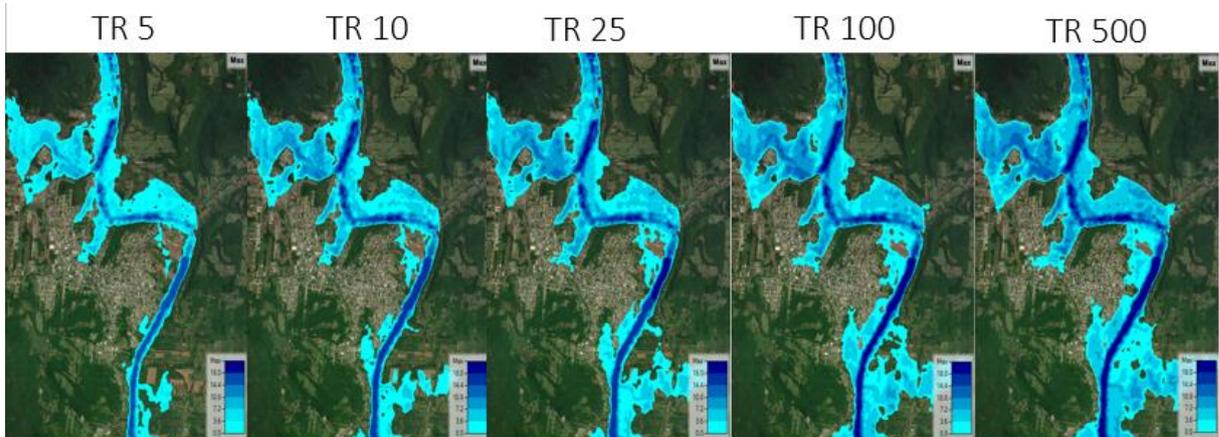
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 21 – Mancha de inundação para TR = 500 anos



Fonte: Elaborado pelo autor

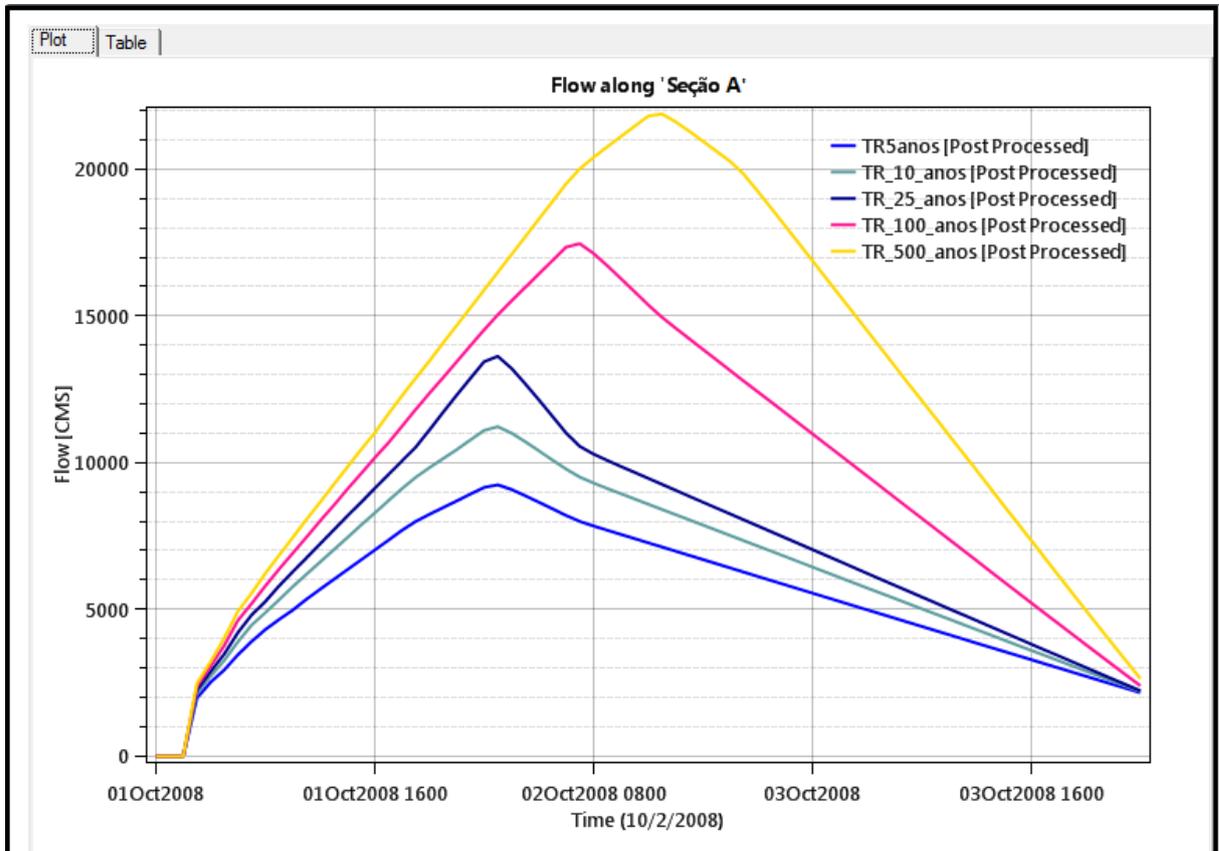
Figura 22 – Variação da mancha de inundação conforme elevação do TR



Fonte: Elaborado pelo autor

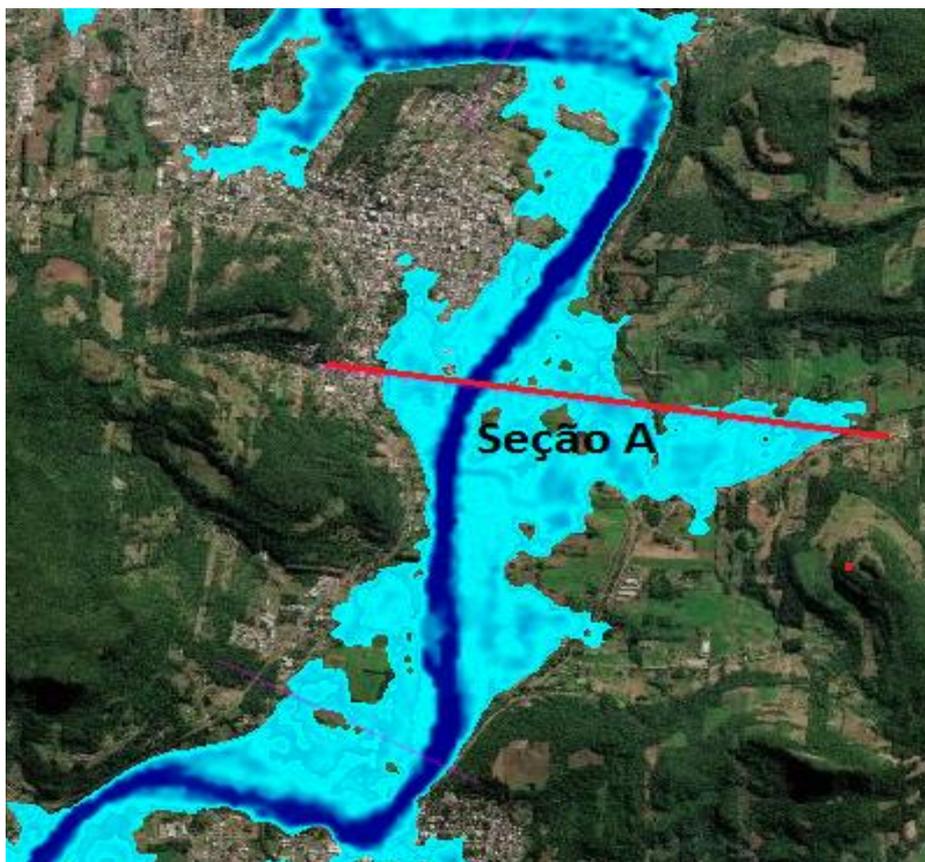
O gráfico 3 apresenta o hidrograma obtido para todos os TRs, extraído da seção transversal do rio indicada com a localização indicada na figura 23.

Gráfico 3 - Hidrograma das vazões para os TRs simulados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 – Localização da seção transversal do hidrograma do modelo

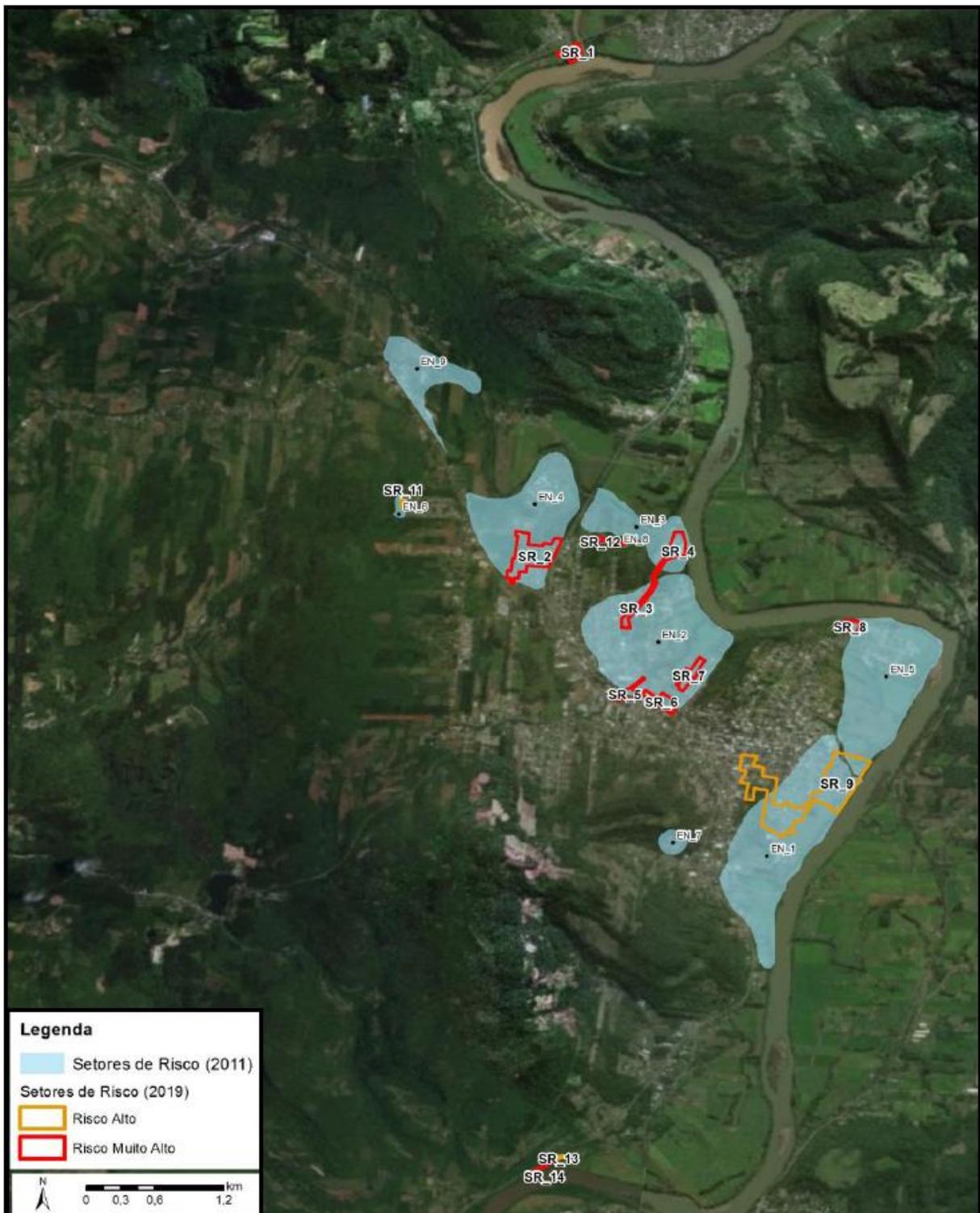


Fonte: Elaborado pelo autor

Na simulação, foi possível obter as manchas de inundação para os tempos de retorno: TR 5 anos, TR 10 anos, TR 25 anos, TR 100 anos e TR 500 anos e comparar com áreas de riscos mapeadas pelo CRPM. Para realização da comparação será realizado apenas com o TR 100 com as zonas SR-02, SR-03, SR-04, SR-05, SR-06, SR-07, SR-08 e SR-09 sujeitas às inundações. Segundo a CPRM (2019) a ocupação do município de Encantado teve início sobre a planície de Inundação da Rio Taquari, sendo áreas sujeitas a constantes eventos de cheia. Dessa forma eventos de inundação se repetiram ao longo dos anos no município. Em 2011, foi realizado um estudo pela CPRM que setorizou o município em 09 regiões com potencial de risco a inundações e movimentação de massa. Como esse estudo era pouco detalhado, áreas muito grandes foram incluídas como de risco, então foi realizado um novo estudo onde novas áreas foram incluídas em setores de risco e alto risco, mas também, algumas áreas foram excluídas dos setores de alto risco ou excluídas dos setores de risco. A figura 25 apresenta, em azul, as primeiras

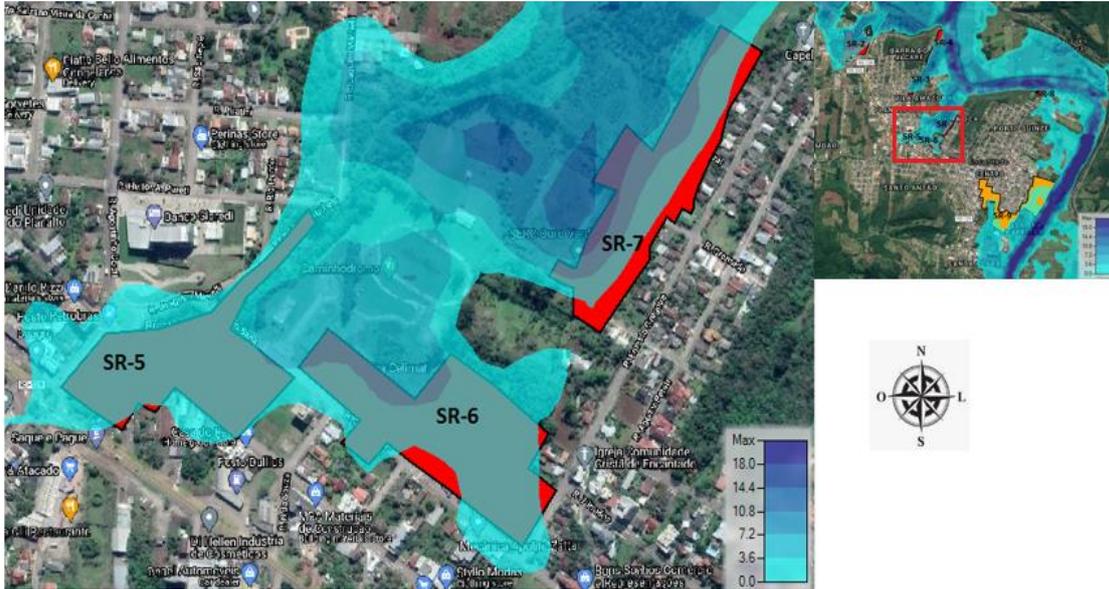
setorizações realizadas em 2011, e em laranja e vermelho as novas setorizações realizadas pela CPRM em 2019.

Figura 24 – Setorizações de risco atuais sobrepostas as antigas.



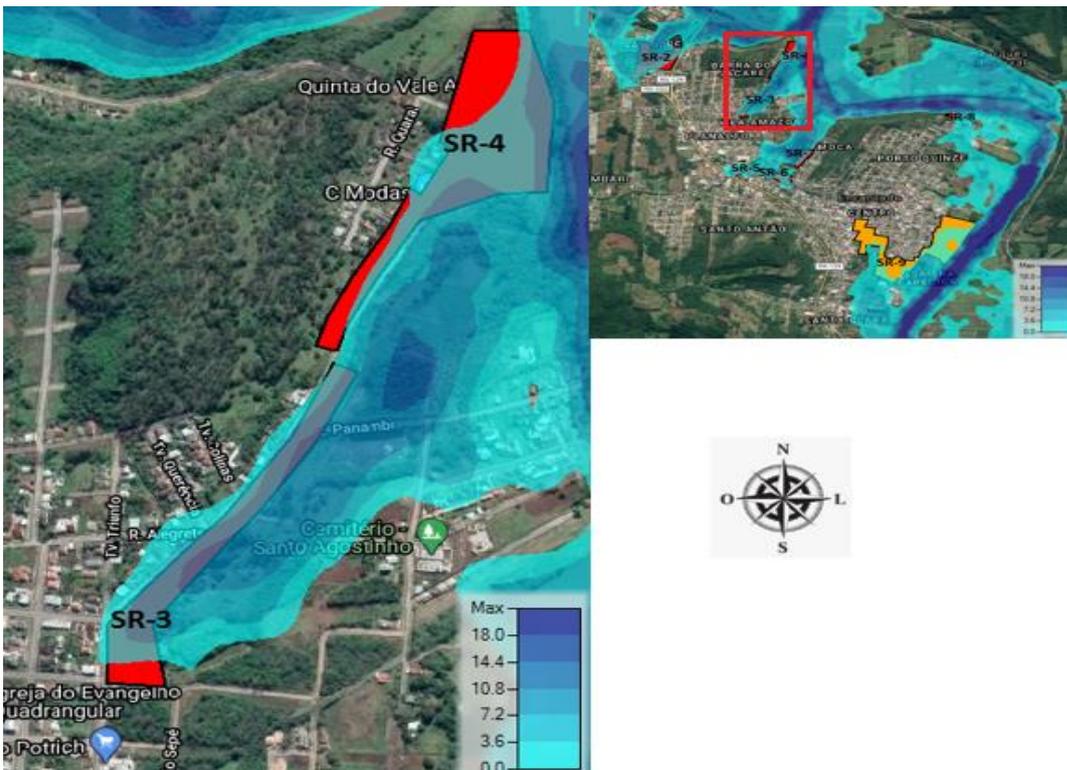
Fonte: CPRM (2020).

Figura 26 – sobreposição aos setores SR-5, SR-6 e SR-7.



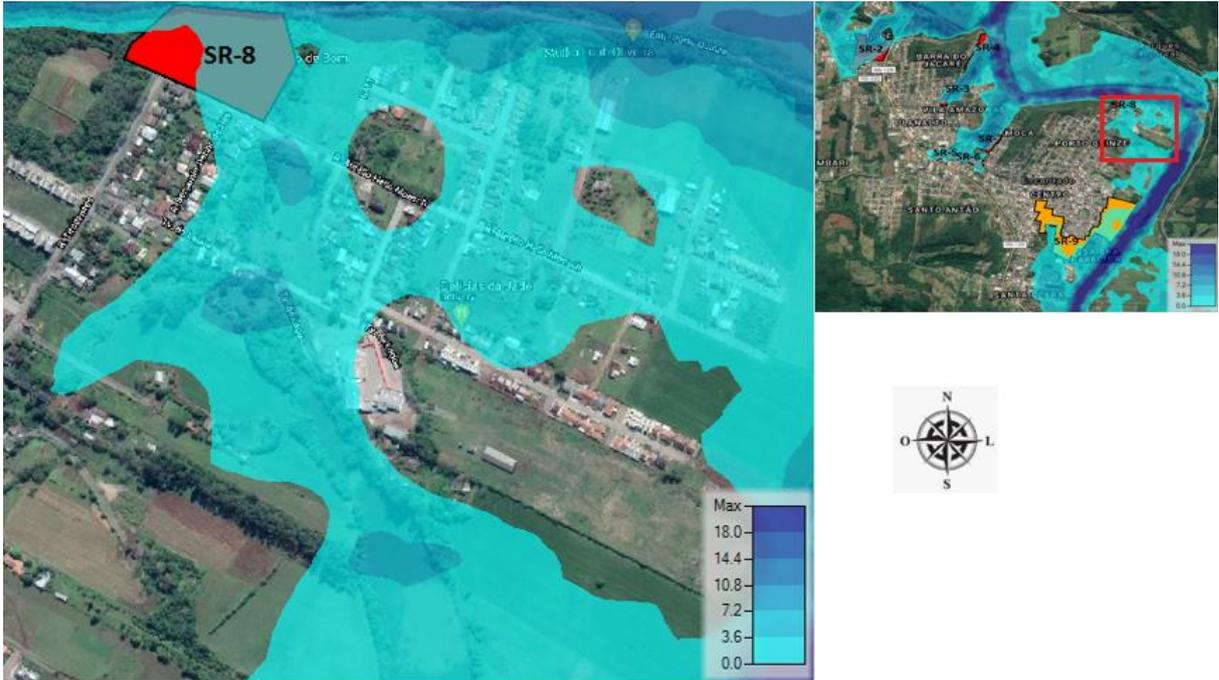
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 – Sobreposição aos setores SR-3 e SR-4.



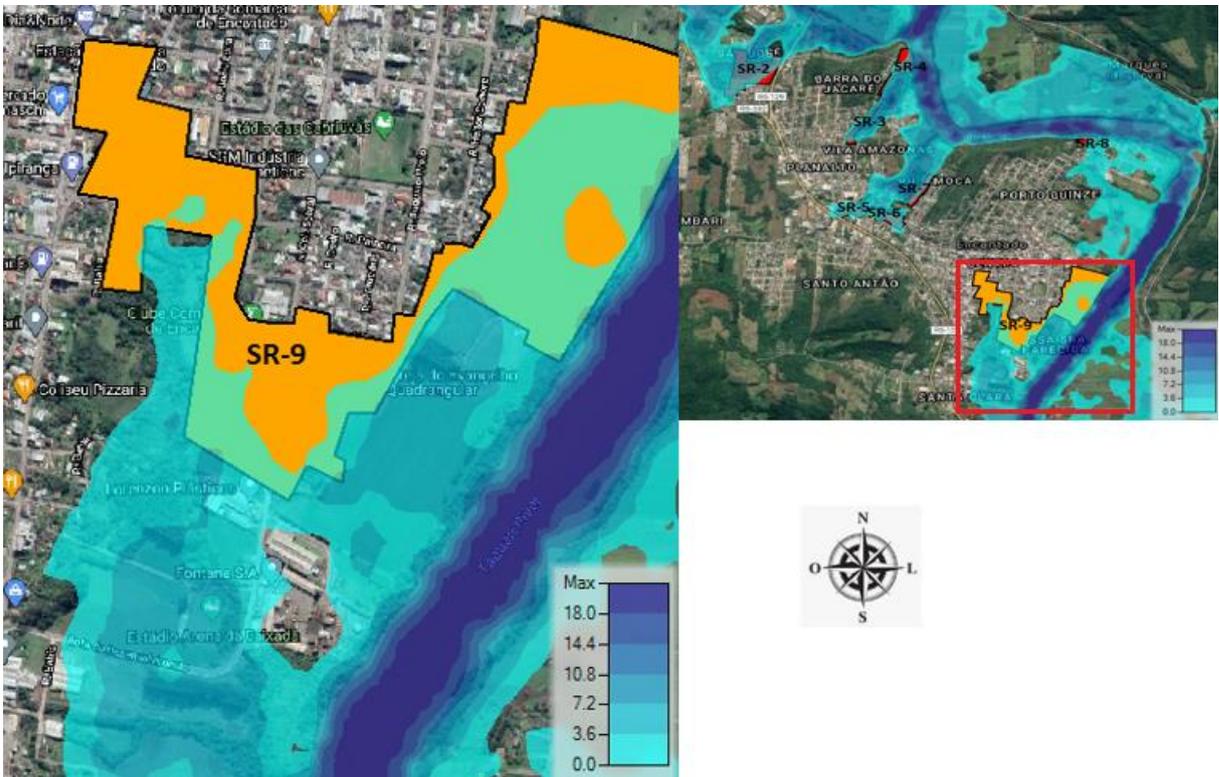
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 28 – Sobreposição ao setor SR-8.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 – Sobreposição ao setor SR-9.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6 CONCLUSÃO

O modelo HEC-RAS mostrou-se eficiente no desenvolvimento de modelagem hidrodinâmica 2D em regime não permanente para rios com grandes vazões como o rio Taquari-Antas. Os resultados mostraram que eventos de inundações podem ser modelados e se obter resultados que nunca ocorreram ou não foram registrados com base em eventos de menores proporções. Assim, pode ter grande contribuição para estudos de proteção de vidas e bens, sendo utilizados como medidas de prevenção para tomadas de decisões ou uso em políticas públicas com objetivos de evitar prejuízos econômicos e humanos.

Os mapas obtidos com a modelagem hidrodinâmica do rio Taquari-Antas, junto ao município de Encantado mostram possíveis consequências de eventos de inundações com diferentes magnitudes e probabilidades de ocorrências.

A CPRM (2020) recomenda para o setor SR-9, localizado no bairro Navegantes, como medidas estruturais a remoção das casas do local ou a implantação de medidas não-estruturais para convivência com os eventos de inundação. Na simulação realizada foi possível concluir que as medidas adotadas pela CPRM são necessárias, pois para o TR 100 anos o local apresentou cotas acima de três metros em algumas casas. Ainda, foi possível observar a inundação desse local, a partir de imagens gravadas no ano de 2020, quando foi registrado a inundação do município. A imagem 3 apresenta imagens registradas em junho de 2020.

Imagem 3 – Inundação bairro Navegantes ocorrida em junho de 2020.



Fonte: Adaptado You Tube (2020).

Nesse evento, ocorrido em junho de 2020, foi possível comparar a inundação com as manchas de inundação para TR 25 e TR 100. A imagem extraída de um vídeo publicado no You Tube, mostra a inundação junto a fábrica Fontana S.A. no município. Com base na imagem não é possível analisar se o tempo de gravação estava ocorrendo simultaneamente com o pico de vazão. Mas pode-se observar que, nesse momento, a inundação chegou próximo ao risco TR100, com base na simulação realizada neste trabalho. Dessa forma, pode-se observar que o cenário de inundação nesse evento ocorrido no mês de junho de 2020 ficou próximo ao TR 100 anos obtidos na simulação. É certo afirmar que os resultados da simulação não são totalmente precisos, então, não pode-se confirmar, apenas com esses dados, que a inundação ocorrida em junho de 2020, de fato, superou ou ficou próxima ao TR 100 anos. Para realizar essa confirmação, seria necessário dados mais precisos da estação fluviométrica do município. Como o Portal Hidroweb não havia atualizado os dados referentes a estação fluviométrica de Encantado até a presente data desse trabalho não foi possível confirmar se realmente esse evento de inundação, ocorrido em junho de 2020, atingiu ou superou o TR de 100 anos. A imagem 4 demonstra a inundação do dia 09 de junho de 2020, em comparação com as manchas de inundação TR 25 e TR 100.

Imagem 4 – Comparação do evento de inundação de junho de 2020 com os TR 25 e TR100 na localização da empresa Fontana S.A.



Fonte: Autor/You Tube (2020).

Mediante os recorrentes eventos de inundação ocorridos no município de Encantado é possível concluir que a vivência com as cheias do rio Taquari tem afetado de forma negativa o município. Medidas de segurança adotadas para melhorar a convivência dos habitantes com as constantes inundações é de grande importância. As medidas não-estruturais não evitam que as casas de setores de risco sejam atingidas pela onda de cheia, então prejuízos materiais são acumulados com a repetição dos eventos, mas, essas medidas não-estruturais, trabalhadas em conjunto com órgãos de segurança são muito eficientes na proteção de vidas. As medidas não-estruturais adotadas pelo município garante a segurança da população exposta aos riscos. Mas, mediante a necessidade de garantir um controle efetivo do problema, que propõe segurança humana e garanta a segurança de bens e assim manter um equilíbrio econômico seguro para investidores ao município, a instalação de medidas estruturais e não estruturais em conjunto seriam uma solução mais eficiente para o problema.

As medidas estruturais são empregadas para solução de problemas semelhantes, mas devido ao grande custo de implantação e de operação seria necessário, no momento, desenvolver estudos de viabilidade econômica e ambiental para implantação dessas estruturas. Medidas estruturais intensivas, como diques, seriam uma solução muito eficiente para o problema local, mas necessitam de

estudos prévios devido a magnitude da sua implantação, pois estas estruturas podem gerar novos problemas no escoamento e a falsa segurança gerada a população, mediante o risco na ocorrência de falhas.

Este trabalho buscou demonstrar, mediante os resultados obtidos, que o município de Encantado apresenta potencial de inundação para baixos TR, (5 e 10) anos, a ainda podem ser agravados mediante a ocorrência de eventos que ainda não foram registrados no município, como TR acima de 100 anos. Ainda foi possível realizar a comparação com áreas inundáveis que não estão incluídas nas regiões demarcadas pelo último estudo realizado pela CPRM (2019), como áreas de risco alto ou risco muito alto, mas apresentam habitações no local.

REFERÊNCIAS

ALVES, Augusto, ECKHARDT, Rafael R., HAETINGER, Claus, R. E., OLIVEIRA, Guilherme G.. **Caracterização espacial das áreas suscetíveis a inundações e enxurradas na bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas**. UFRGS, UVT. Rio Grande do Sul, 2018.

AVELAR, Fabrício G.; BEIJO, Luiz A.; COSTA, Matheus S.. **Comparação de distribuições de probabilidades na previsão de vazões máximas do reservatório de Furnas**. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada. Fortaleza/CE, 2019.

BÁRBARA Impulcetto. **Controle de cheias através de medidas estruturais**. Centro Universitário Anhanguera, 2017.

BARBOSA, Alexandre A.; MARCIANO, Alexandre G.; SILVA, Ana P. M.. **Estudo de cenários na simulação de eventos de cheia no rio Piranguçu e sua Influência no Distrito Industrial de Itajaba – MG**. Revista Brasileira de Energias Renováveis. 1018.

BRUBACHER, João P.; GUASSELLI, Laurindo A.; OLIVEIRA, Guilherme G.; QUEVEDO, Renata P.; SIRÂNGELO, Fabiana. **Suscetibilidade a inundações no município de Encantado/RS**. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, João Pessoa/PB, 2015.

BARBOSA, Francisco de Assis dos Reis. **Medidas de proteção e controle de inundações urbanas na bacia do rio Mamanguape/PB**. Universidade Federal da Paraíba, 2006.

BOLONHEZ, Bruna F., NAMBA, Jhonathan Y. **Modelagem hidrodinâmica: Aplicação do software HEC-RAS para a previsão de níveis d'água máximos nos Ribeirões Maringá e Mandacaru**. Maringá/PR. PIBIC/CNPq-FA-UEM, 2018.

BRESSIANE, Danielle Almeida. **Hidrologia Urbana: Discussão do fenômeno, comparação Brasil e EUA e aplicação do modelo a Chicago**. Monografia apresentada ao curso de Graduação em Engenharia Ambiental. São Carlos. USP, 2010.

BRIGHENTI, Tássia Mattos. **Modelagem Hidrológica e Avaliação de Diferentes Métodos de Calibração para o Modelo SWAT**. Florianópolis. UFSC, 2015.

CAPOZZOLI, Caluan R., CARDOSO, Andrea O., FERRAZ, Simone E. T. **Padrões de Variabilidade de Vazão de Rios nas Principais Bacias Brasileiras e Associação com Índices Climáticos**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 32, n. 2, 243-254, 2017.

CHAFFE, Pedro L. B., LUZI, Lucas M. R., SPECKHANN, Gustavo, A. **Modelagem Hidráulica de Áreas Suscetíveis a Inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão Sul**. Florianópolis, RS. ABRH, 2017.

CHAVES, Marcelo A.. **Modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes para a bacia Amazônica**. UFV. Viçosa, Minas Gerais, 2002.

COLLISCHONN, Walter; TASSI, Rutinéia. **Introduzindo a hidrologia**. IPH UFRGS, 2008.

CHAGAS, Rogério Moreira. **Modelagem hidrodinâmica no baixo São Francisco e análise da quantidade e da qualidade da água para irrigação**. UFS. São Cristóvão/SE, 2009.

CPRM. **Setorização de Áreas em Alto e Muito Alto Risco a Movimentos de Massa, Enchentes e Inundações – Encantado/RS**. 2019. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/21496>. Acesso: 10 out. 2020.

CUNHA, Juliano C.. **O uso do modelo digital de elevação como alternativa para correção dos efeitos da iluminação diferenciada em imagens de satélite.** UFMG. Belo Horizonte, 2001.

DORNELLES, Fernando; GOLDENFUM, Joel A.; MONTE, Benício E. O.; SILVA, Daniele F. S.; TSCHIEDEL, Arthur F.. **Implicações da ausência de dispositivos de proteção na área urbana de Porto Alegre: Análise da cheia de 1941.** XII ENCONTRO NACIONAL DE ÁGUAS URBANAS. Maceió – Alagoas, 2018.

Enchente rio Taquari Encantado RS 8/07/20. 1 Vídeo (3 min 41 s). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=v02JNjDdRk4&t=109s>. Acesso em: 05 set. 2020.

Escritório da ONU para os Assuntos Humanitários (OCHA), Disponível em: <https://nacoesunidas.org/ocha-brasil-esta-entre-paises-com-maior-numero-de-pessoas-expostas-a-inundacoes/>. Acesso em 27 maio 2020.

FEPAM. Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler – RS. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/Taquari-Antas/pag12.html>. Acesso em: 12 out. 2020.

FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Normas de apresentação tabular.** 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1993. Disponível em: <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/monografias/GEBIS%20-%20RJ/normastabular.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2018.

GAÚCHA ZH. Dique que causou alagamento na zona norte da capital é fechado. Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2013/08/>. Acesso em: 25 jun. 2020.

GENZ, Fernando; LUZ, Lafayette D. Metodologia para considerar a variabilidade hidrológica na definição do regime natural de vazões no baixo curso do Rio **São Francisco**. São Paulo. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007.

GOERLI, F. Roberto; KOBAYAMA, Masato. **Considerações Sobre as Inundações no Brasil**. Acadm. de Geografia; Prof. Depto. de Eng. Sanitária e Ambiental, UFSC, 2005.

GOERLI, Roberto Fabris, KOBAYAMA Masato. **Considerações Sobre Inundações no Brasil**. Florianópolis. UFSC, 2014.

GRUPO A HORA. Para Encantado foi a maior enchente da história. Disponível em: <https://grupoahora.net.br/conteudos/2020/07/09/para-encantado-foi-a-maior-enchente-da-historia/>. Acesso em: 25 ago.2020.

HIDRO MUNDO. Método de Muskingum-Cunge. Disponível em: <http://www.hidromundo.com.br/metodo-muskingum-cunge/>, 2020. Acesso em: 10 jun. 2020

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Encantado/RS. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/encantado/panorama>. Acesso em 25 out. 2020

IMPULCETTO, Bárbara, **Controle de cheias através de medidas estruturais**. Leme. Ananguera, 2017.

KOBAYAMA, Masato, et al. **Mapeamento de Áreas de Risco para Prevenção de Desastres Hidrológicos com Ênfase em Modelagem Hidrogeomorfológica**. Porto Alegre, 3ª edição. GPDEN, IPH, UFRGS, 2016.

KUREK, Roberta K. M. **Avaliação do tempo de retorno dos níveis das águas do Rio Taquari/RS**. Lajeado. UNIVATES, 2012.

LEITÃO, Francisco T. Pinheiro. **Manual de Referência do HEC – HAS**. UFC 2018.
LOU, Rodrigo Furtado. **Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do Rio Piabanha/RJ**. UFRJ. Rio de Janeiro, 2010.

MAGRO, Guilherme R.. Modelagem numérica e computacional da hidrodinâmica de reservatórios utilizando as equações bidimensionais de Saint-Venant. FECIV. Uberlândia, 2018.

MATANABE, Frederico M. **Análise do Método de Gumbel para cálculo de dimensionamento de vertedouros**. USP. São Carlos/SP, 2013.

MELATTI, Maurício D.; MARCUZZO, Francisco F. N.. **Modelos digitais de elevação na delimitação automática das sub-bacias do rio Taquari-Antas no Rio Grande do Sul**. CPRM/SGB, IPH/UFRGS. Porto Alegre, 2015.

MENDES, Heloisa C. et al. Reflexões sobre impactos das inundações e propostas de políticas de públicas mitigadoras. São Carlos: USP, EESC, 2008.

METROPLAN, Fundação Estadual de Planejamento Metropolitano e Regional. Disponível em: http://www.metroplan.rs.gov.br/conteudo/2111/?Mapas_de_Inunda%C3%A7%C3%A3o. Acesso em: 23 jun.2020.

MOREIRA, Itamar A. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros**. Curitiba. UFP, 2005.

OLIVEIRA, G. G. SALDANHA, D. L. GUASSELLI, L. A. **Especialização e Análise das Inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Caí/RS**. Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. UFRGS, 2010.

PAZ, Adriano Rolim. **HIDROLOGIA APLICADA**. Caxias do Sul. UERGS, 2004.

PONTES, Rógenes M., COLLISCHONN, Walter. **O modelo Muskingum-Cunge-Todini em rios com planície de inundação**. Porto Alegre. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH) vol 20, nº 2, 2015.

INUNDAÇÕES. PORTAL SÃO FRANCISCO. Disponível em: <https://www.portalsaofrancisco.com.br/geografia/inundacoes>. Acesso em: 10 maio 2020.

JORNAL DO MERCADO. A enchente de 41. Jornal do Mercado, Porto Alegre, 06, nov. 2006. Disponível em: <http://www.jornaldomercado.com.br/a-enchente-de-41/>. Html. Acesso em: 03 maio 2020.

PORTO, Rodrigo; SCHULZ, Harry E.; SIMÕES, André L. A.. **Simulação numérica e verificação experimental da posição da superfície livre de um ressalto hidráulico em um canal regular**. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica Punta Del Este, Uruguay, Novembro, 2010.

SAUSEN, Tania Maria; NARVAES, Igor da Silva. **Desastres naturais e geotecnologias: Inundação – Caderno Didático Nº7**. Santa Maria/RS. Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais (INPE), 2013.

SANTOS, Rozely Ferreira. **Vulnerabilidade Ambiental - Desastres naturais ou fenômenos induzidos?**. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Brasília, 2007.

SARTORI, Maria da Graça B. **A dinâmica do clima do Rio Grande do Sul**. Terra Livre São Paulo Ano 19 - vol. I - n. 20 p. 27-49 jan/jul. 2003.

TUCCI, Carlos E. M. BERTONI, Juan C. **Inundações Urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

TUCCI, Carlos E. M. **Inundações Urbanas**. Porto Alegre: UFRGS, 2003.

TUCCI, Carlos E. M. XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: UFRGS, 2007.

SANTOS, Laércio L. **Modelos hidráulicos-hidrológicos: conceitos e aplicações**. Recife. RBGF- Revista Brasileira de Geografia Física. Vol.2, n.03 set/dez, 2009.

VALENTE, Pedro Teixeira. **Eventos extremos de precipitação no Rio Grande do Sul no Século XX a partir de dados de reanálise e registros históricos.** UFRGS/PPG em Geografia. Porto Alegre, 2015.

WATANABE, Frederico M.. **Análise do método de Gumbel para cálculo de vazão de dimensionamento de vertedouros.** USP. São Carlos/SP, 2013.

YAMAZAKY, D.; IKESHIMA, D.; NEAL, JC; O'LOUGHLIN, F.; SAMPSON, CC; KANAE, S.; BATES, PD. **MERIT DEM: Um novo modelo digital global de elevação de alta precisão e seu mérito para a modelagem hidrodinâmica global.** American Geophysical Union. 2017.