



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Programa de Pós-Graduação em Gestão e
Regulação de Recursos Hídricos

Alex Leão da Fonseca

**Análise hidrometeorológica e modelagem hidráulica e hidrológica
para simulação da mancha de inundação: estudo de caso na bacia do
rio Quitandinha - Petrópolis-RJ**

Rio de Janeiro

2021

Alex Leão da Fonseca

Análise hidrometeorológica e modelagem hidráulica e hidrológica para simulação da mancha de inundação: estudo de caso na bacia do rio Quitandinha - Petrópolis-RJ

Dissertação apresentada, como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROF-ÁGUA), na Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Dourado da Silva

Rio de Janeiro

2021

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

F676 Fonseca, Alex Leão da.
Análise hidrometeorológica e modelagem hidráulica e hidrológica para simulação da mancha de inundação: estudo de caso na bacia do rio Quitandinha - Petrópolis-RJ / Alex Leão da Fonseca. – 2021.
118 f.: il.

Orientador: Francisco de Assis Dourado da Silva.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia e Ciências.

1. Recursos hídricos – Administração – Rio de Janeiro (Estado) – Teses. 2. Inundações – Prevenção – Petrópolis (RJ) – Teses. 3. Modelagem hidrológica – Administração – Rio de Janeiro (RJ) – Teses. 4. Inundações – Quitandinha, Rio (RJ) – Teses. 5. Inundações – Aspectos ambientais – Regiões Metropolitanas – Teses. I. Silva, Francisco de Assis Dourado da. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia e Ciências. IV. Título.

CDU 556.18(815.3)

Bibliotecária responsável: Fernanda Lobo / CRB-7: 5265

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Alex Leão da Fonseca

Análise hidrometeorológica e modelagem hidráulica e hidrológica para simulação da mancha de inundação: Estudo de caso na bacia do rio Quitandinha - Petrópolis-RJ

Dissertação apresentada, como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROF-ÁGUA), na Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Recursos Hídricos, Planejamento Integrado dos Recursos Hídricos.

Aprovada em 27 de agosto de 2021.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Francisco de Assis Dourado da Silva (Orientador)
Instituto de Geologia Aplicada - UERJ

Prof. Dr. Lucio Silvia de Souza
Instituto de Oceanografia Física e Meteorologia - UERJ

Prof. MSc. Cel. Paulo Renato Martins Vaz
Defesa Civil do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro
2021

RESUMO

Fonseca, Alex Leão. *Análise hidrometeorológica e modelagem hidráulica e hidrológica para simulação da mancha de inundação: estudo de caso na bacia do rio Quitandinha - Petrópolis-RJ*. 2021. 109 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROF-ÁGUA), Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

O problema de inundações em áreas urbanas vem crescendo em grandes proporções e afeta significativamente as cidades, especialmente onde o desenvolvimento urbano não ocorreu de forma planejada ou controlada. Na região Serrana do Rio de Janeiro, em especial em Petrópolis, as inundações vêm afetando enormemente a cidade, com o transbordamento do rio Quitandinha. A modelagem hidráulica-hidrológica é uma ferramenta muito importante, uma vez que esta pode fornecer previsões de manchas de inundações em uma bacia hidrográfica, permitindo ao gestor público estabelecer um limite físico, onde este poderá focar nos planos de contingenciamento ou mesmo em ações de mitigação nas regiões sensíveis ou vulneráveis identificadas pela modelagem. Sendo assim, o objetivo deste estudo foi realizar um estudo pluviométrico e fluviométrico da bacia hidrográfica do rio Quitandinha, a partir da série histórica de monitoramento hidrometeorológico desta bacia, assim como simular manchas de inundação um evento hidrometeorológico com transbordamento da calha do rio usando os softwares de modelagem hidráulico-hidrológico HEC-HMS e HEC-RAS. Para tal, foram adotadas bases cartográficas da região, na escala 1:20.000, para elaboração do modelo digital de terreno (MDT), que estimam os dados geométricos da bacia, tais como, delimitação da bacia do rio Quitandinha, comprimento do talvegue e declividade média. Essas bases cartográficas e o MDT foram também utilizados para determinar outros dados de entrada da modelagem, através do uso do software cartográfico ArcGIS. Além disso, foram também adotados os dados de precipitação de sete estações pluviométricas localizadas na bacia do rio Quitandinha e dados fluviométricos de dois pontos de monitoramento no rio Quitandinha, ambos cedidos pelo Instituto Estadual do Ambiente, a fim de calibrar e validar os resultados da modelagem do HEC-HMS e HEC-RAS. Os resultados das simulações para o evento de transbordamento do rio Quitandinha ocorrido no verão de 2019 foram satisfatórios (exatidão de 95%), o que mostra a eficiência da ferramenta na previsão de cenários de inundação em bacias hidrográficas com recorrência deste fenômeno. Conclui-se que o uso de modelo hidráulico-hidrológico (HEC-HMS e HEC-RAS) associado a um sistema de informações geográficas (SIG) pode ser uma ferramenta muito importante para auxiliar no processo decisório da gestão pública quanto aos riscos de inundação. Espera-se que estes resultados subsidiem as ações de mitigação ou contingenciamento das inundações da cidade de Petrópolis.

Palavras-chave: Rio Quitandinha. Inundação. Modelagem hidráulica-hidrológica. Petrópolis. HEC-RAS.

ABSTRACT

Fonseca, Alex Leão. *Análise hidrometeorológica e modelagem hidráulica e hidrológica para simulação da mancha de inundação: estudo de caso na bacia do rio Quitandinha - Petrópolis-RJ*. 2021. 109 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROF-ÁGUA), Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

The floods problem in urban areas has been growing in large proportions and significantly affects cities, especially where urban development has not taken place in a planned or controlled manner. In the Serrana region of Rio de Janeiro, especially in Petrópolis, floods have extremely affected the city, with the overflow of the Quitandinha river. Hydraulic-hydrological modeling is a very important tool, since it can provide forecasts of flood patches in a hydrographic basin, allowing the public manager to establish a physical limit, where they can focus on contingency plans or even mitigation actions in the sensitive or vulnerable regions identified by the modelling. Therefore, the objective of this study was to carry out a pluviometric and fluviometric study of the hydrographic basin of the Quitandinha river, from the historical series of hydrometeorological monitoring of this basin, as well as to simulate flooding spots a meteorological event with overflow of the river channel using the hydraulic-hydrological modeling softwares HEC-HMS and HEC-RAS. To this end, cartographic databases of the region were adopted, at a scale of 1:20,000, to prepare the digital terrain model (DTM), which estimate the basin geometric data, such as the Quitandinha river basin delimitation, the thalweg length and average slope. These cartographic bases and the MDT were also used to determine other modeling input data, through the use of the ArcGis cartographic software. In addition, precipitation data from seven pluviometric stations located in the Quitandinha river basin and fluviometric data from two monitoring points in the Quitandinha river were also adopted, both provided by the State Environmental Institute, in order to calibrate and validate the HEC-HMS and HEC-RAS modeling results. The results of the simulations for the Quitandinha river overflow event that occurred in the summer of 2019 were satisfactory (accuracy of 95%), which shows the efficiency of the tool in predicting flood scenarios in hydrographic basins with recurrence of this phenomenon. It is concluded that the use of the hydraulic-hydrological model (HEC-HMS and HEC-RAS) associated with a geographic information system (GIS) can be a very important tool to assist in the decision-making process of public management regarding flood risks. It is expected that these results support actions to mitigate and contain floods in the Petrópolis city.

Keywords: Quitandinha river. Flood. hydrological-hidraulic Modeling. Petrópolis. HEC-RAS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Planta de Petrópolis elaborada por Köeler em 1846, em destaque a região central da cidade.....	16
Figura 2 –	Plano urbanístico da cidade de Petrópolis desenhado pelo Major Köeler em 1846.....	18
Figura 3 –	Ilustração dos fenômenos de enchentes, inundações e alagamentos.....	20
Figura 4 –	Ponte sobre o rio Quitandinha ligando um estabelecimento comercial na Rua Coronel Veiga.....	21
Figura 5 –	Trecho do rio Quitandinha transbordado na rua Coronel Veiga.....	22
Figura 6 –	Alagamento da avenida Quinze de Novembro (Atual rua do Imperador) e da Praça Don Pedro II no início do século passado.....	23
Figura 7 –	Área urbana na bacia do rio Quitandinha, entre 1966 e 2008 e a indicação dos 15 locais mais críticos pelas inundações.....	25
Figura 8 –	Mapa de localização da área de estudo: Mapa da bacia do Quitandinha detalhando também o curso do rio Quitandinha assim como o rio Palatinado.....	40
Figura 9 –	Características de um hidrograma.....	42
Figura 10 –	Mapa com as áreas de influência das estações de acordo com o método de Thiessen na bacia do rio Quitandinha.....	44
Figura 11 –	Estrutura geológica da Bacia do rio Quitandinha.....	48
Figura 12 –	Fluxograma do processo de modelagem hidrológica utilizando o	

	HEC-HMS.....	50
Figura 13 –	Mapa da bacia do rio Quitandinha com a localização das estações pluviométrica e fluviométricas operadas pelo INEA.....	56
Figura 14 –	Mapa de distribuição das chuvas na bacia do rio Quitandinha, com a localização das estações pluviométrica e fluviométricas operadas pelo INEA.....	57
Figura 15 –	Histograma de precipitação acumulada mensal do período de 2011 a 2018 na bacia do rio Quitandinha.....	58
Figura 16 –	Precipitação média mensal acumulada versus níveis normal (percentil 90), mínimo e máximo do rio Quitandinha dos anos de 2011 a 2018, com a cota de transbordamento do rio ressaltado com a linha preta.....	61
Figura 17 –	Hidrograma da estação Cel. Veiga no verão 2017/2018.....	63
Figura 18 –	Transbordamentos em dezembro de 2017 na estação Cel. Veiga.....	64
Figura 19 –	Transbordamentos em janeiro de 2018 na estação Cel. Veiga.....	66
Figura 20 –	Transbordamentos em fevereiro de 2018 na estação Cel. Veiga.....	68
Figura 21 –	Transbordamentos em março de 2018 na estação Cel. Veiga.....	70
Figura 22 –	Hidrograma da estação Centro no verão 2017/2018.....	74
Figura 23 –	Transbordamento em dezembro de 2017 na estação Centro.....	75
Figura 24 –	Transbordamento em fevereiro de 2017 na estação Centro.....	76
Figura 25 –	Transbordamentos em março de 2018 na estação Centro.....	77
Figura 26 –	Mapa do modelo digital do terreno da bacia do rio Quitandinha.....	79
Figura 27 –	Mapa das sub-bacias do rio Quitandinha.....	80
Figura 28 –	Mapa de Uso e Ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio	82

	Quitandinha.....	
Figura 29 –	Gráfico de vazões simuladas pelo HEC-HMS para o evento do dia 15/01/2019 nas estações de monitoramento do rio Quitandinha.....	84
Figura 30 –	Gráfico da simulação no HEC-HMS na estação Centro no dia 15/01/2019.....	85
Figura 31 –	Gráfico da simulação no HEC-HMS na estação Centro no dia 13/02/2019.....	87
Figura 32 –	Mapa com o posicionamento das manchas de cheias na bacia hidrográfica do rio Quitandinha simuladas no dia 15/01/2019.....	88
Figura 33 –	Mapa de velocidade da água do rio Quitandinha nas proximidades da estação Centro simulado para o evento hidrometeorológico do dia 15/01/2019.....	89
Figura 34 –	Mapa de velocidade da água do rio Quitandinha nas proximidades da estação Cel. Veiga simulado para o evento hidrometeorológico do dia 15/01/2019.....	90
Figura 35 –	Mancha de inundação com destaque na região central de Petrópolis simulado para o evento hidrometeorológico do dia 15/01/2019.....	91
Figura 36 –	Mancha de inundação nas imediações da estação Cel. Veiga simulado para o evento hidrometeorológico do dia 15/01/2019.....	92
Figura 37 –	Parque linear.....	95
Figura 38 –	Pavimento permeável.....	97
Figura 39 –	Piscinão.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Pontos de alagamento e casos de inundação na bacia do rio Quitandinha entre 1996 e 2008.....	24
Tabela 2 –	Fluxograma da metodologia adotada para a modelagem hidráulica-hidrológica.....	38
Tabela 3 –	Estações de monitoramento hidrometeorológico.....	41
Tabela 4 –	CN fornecido através do cruzamento dos dados de capacidade de infiltração da área por tipo de solo e o tipo de uso e ocupação do solo.	52
Tabela 5 –	Uso do solo e os respectivos coeficientes de Manning.....	55
Tabela 6 –	Dados pluviométricos da estação Cel. Veiga no período de 2011 a 2018.....	59
Tabela 7 –	Dados pluviométricos da estação Centro no período de 2011 a 2018..	59
Tabela 8 –	Número de transbordamentos da calha do rio Quitandinha na estação Cel. Veiga e Centro no período de 2016 a 2018.....	62
Tabela 9 –	Tr, Tp, Ti, Tc, Te, Td (min) de cada evento com transbordamento na estação Cel. Veiga no verão 2017/2018.....	73
Tabela 10 –	Tr, Tp, Ti, Tc, Te, Td (min) de cada evento com transbordamento na estação Centro no verão 2017/2018.....	78
Tabela 11 –	Dados físicos das sub-bacias hidrográficas do rio Quitandinha.....	81
Tabela 12 –	Dados de CN em relação ao tipo e ocupação do solo da bacia do rio Quitandinha.....	83
Tabela 13 –	Vazões simuladas pelo HEC-HMS para o período da tarde para estação Centro no dia 13/02/2019.....	86

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	12
1.	OBJETIVO	14
1.1.	Geral	14
1.2.	Específicos	14
2.	MATERIAL E MÉTODOS	15
2.1.	Área de Estudo	15
2.1.1.	Os problemas das inundações em Petrópolis	19
2.2.	Modelos Hidráulico-hidrológicos	27
2.2.1.	HEC-HMS	32
2.2.2.	HEC-RAS	34
3.	METODOLOGIA	37
3.1.	Área de estudo	39
3.2.	Diagnóstico das inundações na bacia do rio Quitandinha	41
3.3.	Dados de entrada dos modelos HEC-HMS e HEC-RAS	43
3.3.1.	Dados hidrometeorológicos na bacia do rio Quitandinha	43
3.3.2.	Curva de Nível	44
3.3.3.	Modelo Digital do Terreno (MDT)	45
3.3.4.	Determinação da bacia hidrográfica e microbacias	45
3.3.5.	Determinação dos dados físicos da bacia hidrográfica	46
3.3.6.	Uso do solo da bacia do rio Quitandinha	49
3.4.	Simulação do modelo HEC-HMS	49
3.4.1.	Calibração do modelo HEC-HMS	51
3.4.2.	Validação do modelo HEC-HMS	53
3.5.	Simulação do modelo HEC-RAS	54
3.5.1.	Calibração do modelo HEC-RAS	54
3.5.2.	Validação do modelo HEC-RAS	55
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1.	Análise fluviométrica e pluviométrica da bacia hidrográfica do rio Quitandinha	56
4.1.1.	Avaliação dos regimes de chuvas da bacia hidrográfica do rio Quitandinha	56

4.1.2.	Avaliação fluviométrica do rio Quitandinha	60
4.1.3.	Análise dos transbordamentos da estação Cel. Veiga	63
4.1.4.	Análise dos transbordamentos da estação Centro	74
4.2.	Características da bacia hidrográfica do rio Quitandinha	79
4.2.1.	MDT	79
4.2.2.	Bacia Hidrográfica do rio Quitandinha e suas Sub-bacias	79
4.2.3.	Dados físicos e pedológicos da bacia hidrográfica do rio Quitandinha	80
4.2.4.	Parâmetro CN e Uso e Ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio Quitandinha	81
4.3.	Simulação de manchas de cheia na bacia hidrográfica do rio Quitandinha	83
4.4.	Métodos de mitigação de inundações	93
	CONCLUSÃO	99
	REFERÊNCIAS	102

INTRODUÇÃO

Vidas perdidas, transtornos urbanos e perdas econômicas são algumas das consequências da falta de planejamento das cidades quando da ocorrência de eventos extremos. Dentre os problemas advindos destes episódios, os eventos relacionados aos grupos hidrológicos, como enxurradas e inundações dos rios, são responsáveis pela maior parte destes efeitos (Banco Mundial, 2020).

As inundações sempre foram um grande problema hidrológico. Porém, fatores como, o aumento da impermeabilização do solo e do desmatamento, o adensamento populacional desordenado e as variações climáticas têm sido determinantes para definir a recorrências das inundações, elevando os prejuízos sociais e econômicos para as cidades (ARONICA et al., 2012; SARHADI et al., 2012; ANDRADE, 2017). Canholi (2005) afirma que quando as inundações se estabelecem de forma recorrente em uma bacia hidrográfica, além do problema de alocação de espaço, a combinação dos efeitos no tempo passa a ser crítica.

O problema de inundações em áreas urbanas vem crescendo gradualmente e afeta significativamente as grandes cidades, especialmente aquelas onde há falta de infraestrutura urbana eficiente, ou até mesmo nas que o desenvolvimento urbano não ocorreu de forma planejada ou controlada, aliada à crescente favelização, com a ocupação e o uso do solo desordenados (LOU, 2010; VERÓ *et al.*, 2011; BNDES, 2020). Segundo Lou (2010), todos esses aspectos têm levado inúmeros pesquisadores a buscarem uma solução efetiva para o seu controle. Logo, a compreensão da maneira como a urbanização interfere nas cheias é muito importante para que o planejamento e o controle de inundações urbanas sejam realizados de forma adequada (VERÓ *et al.*, 2011).

Em 2011, a região serrana do Rio de Janeiro teve uma das suas maiores catástrofes climáticas do país. A tragédia ocorreu em função do alto índice pluviométrico junto com as condições geológicas da região, sendo agravada por sua falta de infraestrutura e ocupações irregulares do solo (CASTILHO et al., 2012). Estes eventos com efeitos devastadores possuem uma baixa probabilidade de ocorrência,

porém, devido a sua magnitude, despertam o interesse de pesquisadores e da administração pública, a fim de delinear soluções de mitigação das suas ocorrências (MEDIAMENTE, 2002). Apesar de 2011 ter registrado um dos piores eventos extremos, Petrópolis possui registros de inundação desde de 1850. Segundo o Plano de Contingência de Proteção e Defesa Civil (PETRÓPOLIS, 2013), desde o século XX vários anos se destacaram pela intensidade e magnitude das inundações, tais como os anos de 1930, 1945, 1947, 1966, 1988 e 2011. Além disso, o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (2011) também informa que ocorreram 28 desastres em Petrópolis entre 1991 e 2010.

A predominância dos eventos hidrometeorológicos e o somatório de ocorrências de inundações em Petrópolis geraram variados prejuízos econômicos, sociais e ambientais na cidade (PETRÓPOLIS, 2013), o que justificam a necessidade de estudos mais abrangentes nesta região. De acordo com Ward (1978), conviver com os impactos das inundações mitigadas através de um planejamento urbano e ambiental integrados é uma solução que deveria ser adotada pela sociedade civil e pela administração pública.

O conhecimento do comportamento hidrológico e das características fisiográficas de bacias hidrográficas é um caminho para auxiliar nos processos de decisão que envolvem as temáticas chuvas, enchentes, inundações, e os danos em geral decorrentes das mesmas (ANDRADE, 2017). Segundo Mediamente (2002), a política pública de uso e ocupação do solo acompanhado de gerenciamento de recursos hídricos apropriado, podem evitar as grandes catástrofes provenientes da ocupação desordenada das margens dos rios. Nesse contexto, a modelagem matemática surge como importante ferramenta computacional de apoio à decisão e ao desenho de soluções efetivas de mitigação de danos, devido a sua capacidade de fornecer respostas sistêmicas para cenários diversos, em um exercício de predição e antecipação a possíveis efeitos resultantes de inundações oriundas de grandes volumes de chuvas (CANHOLI, 2005; LOU, 2010; ANDRADE, 2017). Logo, a modelagem hidráulica-hidrológica para elaboração de mapas de inundações de uma bacia hidrográfica pode ser considerada uma importante ferramenta de gestão para a administração pública. Entretanto, para isto são necessários estudos do comportamento

hidrológico e hidráulico da bacia hidrográfica (ANDRADE, 2017; LIMA NETO, 2019), que será adotada como unidade de planejamento e projeto integrado.

1 OBEJETIVO

1.1 Geral

Diante do exposto, este trabalho tem por objetivo estudar o comportamento pluviométrico e fluviométrico da bacia hidrográfica do rio Quitandinha, assim como simular a mancha de inundação de um evento hidrometeorológico com transbordamento da calha do rio com o uso de modelagem hidráulico-hidrológico HEC-HMS e HEC-RAS na região central do município de Petrópolis – RJ, de forma a subsidiar as políticas públicas aplicadas à cidade. Sendo os objetivos específicos:

1.2 Específicos

- a) Análise das chuvas ocorridas em Petrópolis, em especial na bacia do rio Quitandinha, entre os anos de 2013 a 2018;
- b) Análise dos transbordamentos do rio Quitandinha no verão de 2017;
- c) Delimitação da bacia do rio Quitandinha;
- d) Mapeamento do uso e ocupação do solo na bacia do rio Quitandinha;
- e) Transformação de chuva-vazão de um evento hidrometeorológico;
- f) Mapa de inundação na região central do município de Petrópolis-RJ, pertencente à bacia do rio Quitandinha para um evento hidrometeorológico do ano de 2019;

2 MATERIAL E MÉTODOS

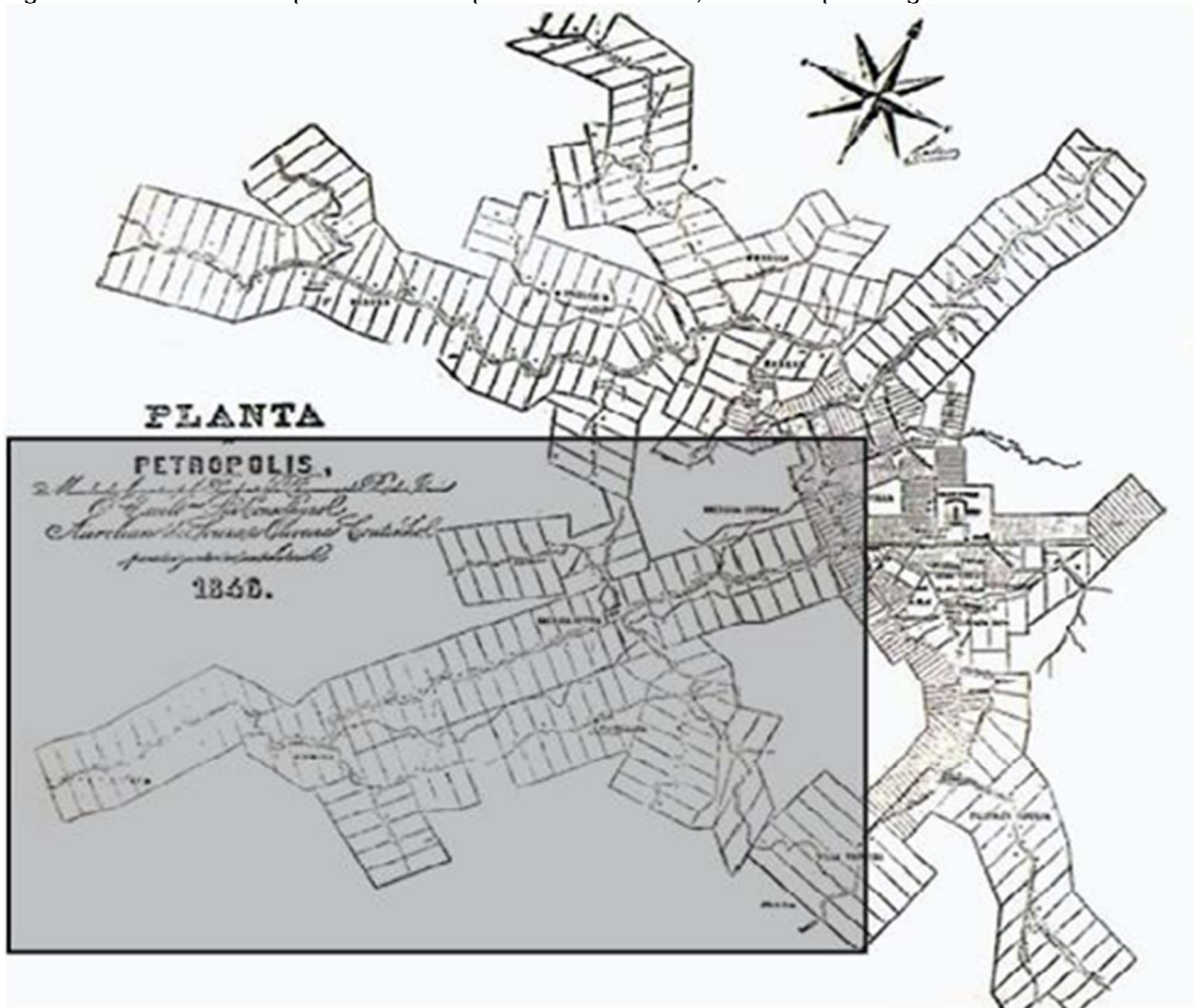
2.1. Área de Estudo

Atualmente, Petrópolis conta com mais de 295 mil habitantes em um território de pouco menos de 800 km², alcançando uma densidade demográfica de 371,85 hab km² e um produto interno bruto (PIB) per capita de R\$ 42.564,57. Estes são um dos motivos pelos quais a cidade passou a ter relevância no estado do Rio de Janeiro, sendo uma das 21 cidades que compõem a região metropolitana do Rio de Janeiro (IBGE, 2010). Porém, em 1843, ano de sua fundação, a cidade era apenas uma fazenda, que foi arrendada ao major alemão Júlio Frederico Koeler (Decreto-Lei imperial nº 255), para dar início elaboração de um plano urbanístico visando à construção da Vila Imperial, que serviria como residência de verão da família imperial (EPPINGHAUS, 1969; TAULOIS, 2007).

O projeto de Koeler foi visionário no Brasil, já que Petrópolis foi a segunda cidade projetada do país, atrás apenas de Recife, que foi projetada pelos holandeses (TAULOIS, 2007). O major elaborou o projeto a partir de um grande levantamento das características físicas da região (EPPINGHAUS, 1969), pois o município está situado em uma região predominantemente montanhosa, possuindo altitude média de 845 metros (AVELAR et al., 2013).

Segundo Taulois (2007), o plano urbanístico de Koeler (Figura 1), alterou o antigo estilo português de construir as casas com o fundo para os rios, no qual estes eram utilizados apenas como esgoto e passou a utilizar o curso dos rios para traçar as avenidas e ruas da cidade.

Figura 1 - Planta de Petrópolis elaborada por Koeler em 1846, em destaque a região central da cidade.



Fonte: PLACIDO e CUNHA, 2010

Segundo Eppinghaus (1969), Koeler teve grandes preocupações com a devastação das matas, erosão nas encostas e suas consequências danosas com o escoamento das grandes precipitações pluviométricas, que já naquela época eram bastante volumosas. De acordo com Guerra (2007), o major não se limitou a projetar a cidade, como também formulou o que seria o primeiro código de posturas municipais da cidade de Petrópolis, que entre suas recomendações estão:

- a) Os lotes seguiam-se ao longo dos rios e tinham mais profundidade que largura (55m x 110m), subindo as encostas dos morros, adaptando-se à topografia acidentada;

- b) Era proibido utilizar o topo dos morros; proibida também a subdivisão dos lotes; as áreas com maior declividade não poderiam ser ocupadas, preservando-se a sua cobertura vegetal para evitar deslizamentos;
- c) Os proprietários tinham que plantar árvores nativas na testada dos terrenos; realizar a construção de calçada com 2,20 m de largura em alvenaria, no prazo de 1 ano e em pedra, no prazo de 8 anos;
- d) Obrigação de cercar ou murar solidamente os lotes de terra, dentro de um ano, no máximo;
- e) Prévia aprovação das fachadas dos prédios;
- f) Obrigação de construir dentro de 2 a 4 anos;
- g) Aos proprietários exigia-se que fosse conduzida a água dos telhados para as ruas, por meio de canos;

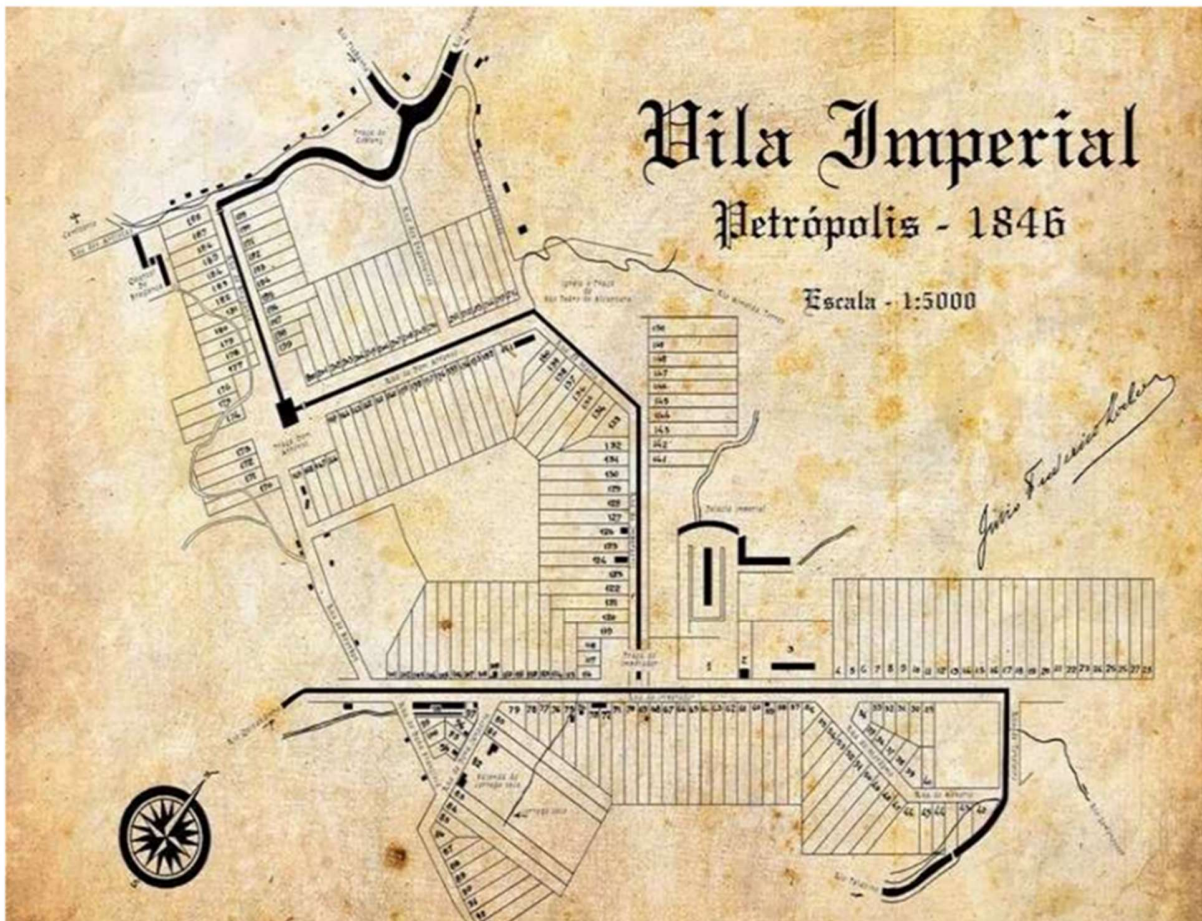
Apesar do código de posturas de Petrópolis realizado na época do Império levar em conta aspectos ambientais, este não foi suficiente para evitar os problemas com as inundações na cidade e muito menos evitar os desastres ambientais. Pois, o plano municipal deixou de ser seguido ao longo dos anos e a população de Petrópolis alcançou níveis muito acima dos esperados, levando a ocupação das encostas e o lançamento de esgoto nos rios (FABRIANI, 1991; PLACIDO e CUNHA, 2010).

De acordo com os dados publicados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), Petrópolis permanece com um baixo grau de urbanização e de urbanização de vias públicas (aproximadamente 44%), porém conta com 38% de arborização por estas vias e pouco mais de 82% da cidade com esgoto sanitário adequado.

Koeler foi responsável por grande parte das obras que ocorreram na cidade de Petrópolis, como as estradas, o projeto do palácio imperial, a arquitetura dos quarteirões e a canalização do rio (GUERRA, 2007). Muitos engenheiros responsáveis pela drenagem urbana costumam adotar a canalização dos cursos d'água como forma de aumentar a velocidade de escoamento e expulsar a água rapidamente evitando a inundação. Porém, tal solução pode transferir o problema para áreas a jusante na bacia hidrográfica, aumentando a magnitude e frequência das inundações (DECINA, 2012).

Uma das intervenções mais significativas e que será discutida com mais detalhe neste estudo foi o projeto que mudou o curso de um trecho do rio Quitandinha, para que este passasse na avenida em frente ao palácio imperial e dar importância paisagística ao rio, como pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 - Plano urbanístico da cidade de Petrópolis desenhado pelo Major Köeler em 1846.



Fonte: Biblioteca do Museu Imperial.

Os rios Quitandinha e Palatinato encontram-se de forma frontal, e depois fazem uma curva de 90° para seguir seu curso na rua da Imperatriz (GUERRA, 2007). De acordo com Gonzalez (2014), essa intervenção causa uma perda de carga no escoamento das águas da chuva, e uma diminuição da velocidade, que pode acarretar acúmulo de água a montante do encontro dos rios. Esta análise já era observada no início do século passado, pois o engenheiro sanitarista Saturnino de Brito, em seu livro

“Projetos e Relatórios de Drenagem”, escrito em 1900, comentou sobre este erro no projeto de Koeler e que o mesmo traria consequências negativas para a cidade posteriormente, como pode ser observado no trecho a seguir:

A confluência das águas que vem do Palatinato (...) e descem da Renânia (Quitandinha), tem lugar de um modo menos favorável ao escoamento; os cursos convergentes descem segundo o mesmo alinhamento reto, ocupando o eixo da avenida 15 de Novembro (atual Rua do Imperador) e, encontrando-se em frente à avenida Sete de Setembro (atual Rua Raul de Leoni), obedecem a curvas fortíssimas e seguem pelo eixo desta avenida, o qual é perpendicular ao da Avenida 15 de Novembro, formando-se um T. Pode-se dizer que as veias líquidas se “fundem à força”, e, se a seção de vazão do curso que as recebe não for muito folgada, a inundação das margens já vem encontrar nos defeitos da retificação motivos bastantes para ocorrer, independentemente de fenômenos meteorológicos extraordinários. (BRITO, 1943, pp. 165).

Ao produzir ações antrópicas que desenham as cidades, a fim de garantir conforto e bem-estar, o homem modifica os sistemas de drenagem natural, causando inundações que podem trazer resultados negativos com efeitos colaterais contra seu próprio bem estar (LOU, 2010). Além disso, causam impactos desastrosos nas áreas afetadas, provocando perdas humanas e materiais.

2.1.1. Os problemas das inundações em Petrópolis

Antes de tratarmos especificamente das inundações em Petrópolis é preciso esclarecer alguns conceitos essenciais para o prosseguimento deste estudo, tal como a definição de inundação. Pois, o fenômeno da inundação é muitas vezes confundido com os fenômenos de cheias, enchentes ou até mesmo alagamentos. Segundo Goerl (2005), isso ocorre devido a erros e adaptações mal feitas na tradução de outras línguas estrangeiras destes termos para o português.

De acordo com as definições trazidas pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2017) na Figura 3, a enchente ou cheia do rio é identificada quando as águas de rios, lagos, diques, reservatórios ou estuários elevam-se até a altura de suas margens, sem que ocorra o extravasamento para as áreas adjacentes. A partir do momento em que as águas transbordam para áreas vizinhas, é verificado o fenômeno da inundação. Por fim,

é possível também observar que os alagamentos são acúmulos de água não necessariamente são provenientes do transbordamento de um corpo hídrico.

Figura 3 - Ilustração dos fenômenos de enchentes, inundações e alagamentos



Fonte: Adaptado CPRM, 2017

Segundo a Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE, 2012), a inundação é a submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água em zonas que normalmente não se encontram submersas. O transbordamento ocorre de modo gradual, geralmente ocasionado por chuvas prolongadas em áreas de planície; já o alagamento é a extrapolação da capacidade de escoamento de sistemas de drenagem urbana e consequente acúmulo de água em ruas, calçadas ou outras infraestruturas urbanas, em decorrência de precipitações intensas.

De acordo com o Instituto Norte Americano Estratégico para Redução de Desastres (ISDR, 2009), as inundações se tratam de um dos fenômenos naturais mais ocorrentes no mundo, sendo uma das mais dramáticas interações entre homem e o seu ambiente, atingindo especialmente as áreas mais urbanizadas, principalmente, em razão da ocupação desordenada nas faixas marginais dos rios e da impermeabilização do solo com os asfaltamentos.

A cidade de Petrópolis vem há muito tempo sofrendo com as inundações provocadas pelos transbordamentos do rio Quitandinha. O mais expressivo fenômeno natural que assolou a região serrana do Rio de Janeiro (RSRJ) foi o desastre climático

ocorrido em janeiro de 2011, que atualmente faz 10 anos de sua ocorrência, o qual foi considerado o maior da história do país, afetando diretamente 20 municípios e 90 mil pessoas. Foram 30 mil desabrigados e desalojados, bem como 916 vítimas fatais das inundações, deslizamentos e desabamentos (CASTILHO et al., 2012). Segundo Bandeira et al. (2011), Petrópolis registrou 65 mortos.

Segundo Fabriani (1991), de acordo com a análise feita em relação a desastres que aconteceram na RSRJ em 1988, já foi possível garantir que a existência de leis urbanas para proteção ambiental não foi suficiente para impedir que as cidades desta região enfrentassem problemas quanto aos serviços públicos, precariedade no sistema viário, falta de planejamento em relação à expansão residencial e o aumento de sistema sanitário.

Com o crescimento de Petrópolis, pode-se observar que houve também um aumento significativo na frequência dos eventos associados às inundações, consequências da perda no desempenho do rio Quitandinha durante as chuvas. Segundo Placido e Cunha (2010), esses eventos de inundação estão também associados aos problemas encontrados nas redes de canais da cidade, como o grande número de pontes que atravessam os rios (Figura 4). Essas pontes dificultam ainda mais o escoamento das águas do rio Quitandinha durante as cheias.

Figura 4 - Ponte sobre o rio Quitandinha ligando um estabelecimento comercial na Rua Coronel Veiga.



Fonte: PLACIDO E CUNHA, 2010

Segundo o relatório da extinta Secretaria Estadual de Rios e Lagos (SERLA) em conjunto com a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ/COPPE, 1998) foi identificado que durante cheias extraordinárias, em alguns pontos, o nível da água pode chegar a cerca de dois metros do nível da rua. O relatório também alertava sobre a questão do tombamento dos rios em Petrópolis, pois na década de 1980, o Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), formalizou o tombamento de logradouros, unidades fabris e prédios isolados conforme descreve o parágrafo IV do referido tombamento, a saber:

Calha do rio Piabanha e seus afluentes, rio Quitandinha e seus afluentes. São considerados elementos integrantes deste tombamento: árvores plantadas às margens dos rios, as pontes, as muretas e os guarda-corpos, cujas características encontram-se especificadas no processo relativo ao acervo arquitetônico e paisagístico da cidade imperial de Petrópolis.

Este tombamento impede que certas soluções estruturais sejam realizadas na região e que eventos de inundações nas principais vias da cidade deixem de ocorrer durante as fortes chuvas, como pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 - Trecho do rio Quitandinha transbordado na rua Coronel Veiga.



Fonte: Flávia Freitas / Portal G1 , 2014.

Somando-se a isso, as inundações em áreas urbanas também são agravadas com as fortes precipitações, que carregam para os corpos receptores um volume considerável de sedimentos provenientes da erosão do solo e resíduos sólidos presentes nos logradouros públicos. Essa água que percorre por toda a área urbana carrega consigo todo tipo de material indesejado, como lixo domiciliar, vegetação, resto de construção civil, entre outros. O despejo desses materiais no rio ou na rede de drenagem, além de contribuir para a degradação ambiental dos recursos hídricos, comprometem toda a drenagem urbana, promovendo a elevação das águas para montante, configurando um gradativo remanso e extravasamento para áreas marginais.

Apesar de as inundações terem se intensificado ao longo dos anos, os problemas provocados pelas cheias do rio Quitandinha não são recentes, pois no início do século passado já se registravam os alagamentos das vias principais da cidade (Figura 6).

Figura 6 - Alagamento da avenida Quinze de Novembro (Atual rua do Imperador) e da Praça Don Pedro II no início do século passado



Fonte: Acervo Digital do Museu Imperial.

As frequentes inundações do rio Quitandinha ao longo dos anos ficam mais evidentes no estudo de Plácido e Cunha (2010), pois foram identificados os principais pontos de alagamentos na bacia do rio Quitandinha causados por inundações (Figura 7), além do quantitativo de casos registrados durante as chuvas fortes de verão no período de 1966 a 2008, através de pesquisa de informações das inundações registradas nos jornais (Tabela 1).

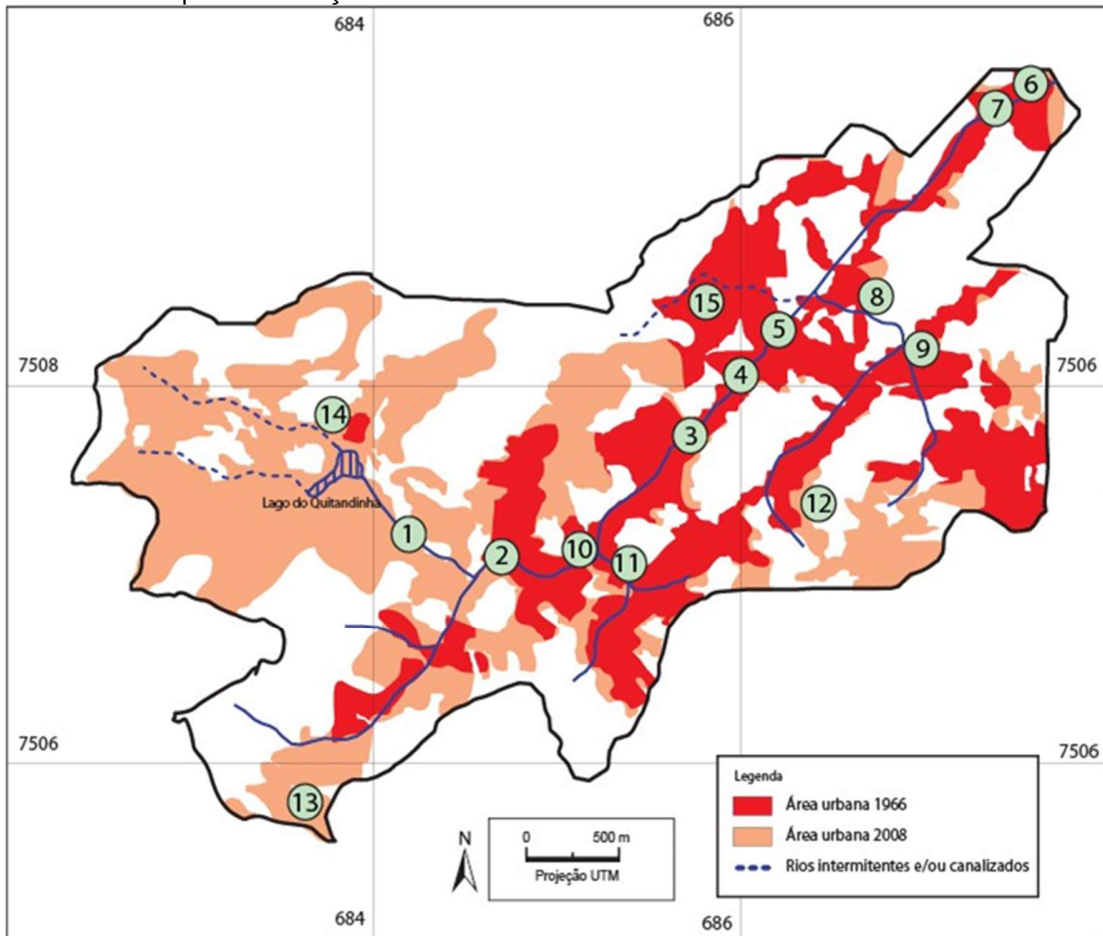
Tabela 1 - Pontos de alagamento e casos de inundação na bacia do rio Quitandinha entre 1996 e 2008.

Ponto	Pontos de Alagamento	Rio	Nº de casos de inundação
1	Rua Afrânio Melo Franco	Quitandinha	6
2	Rua Dr. Thouzet	Quitandinha	16
3	Volkswagen (Rua Coronel Veiga)	Quitandinha	96
4	Instituto Teológico Franciscano	Quitandinha	80
5	COMDEP	Quitandinha	80
6	Rua Alencar Lima	Quitandinha	14
7	Rua do Imperador	Quitandinha	14
8	Rua Saldanha Marinho	Aureliano	13
9	Praça Pasteur	Aureliano	13
10	Ponte Fones	Saturnino	18
11	Rua Olavo Bilac	Saturnino	18
12	Chácara Flora	-	3
13	Independência	-	9
14	Rua Getúlio Vargas	-	5
15	Valparaíso	-	5

Fonte: Adaptado de PLACIDO e CUNHA, 2010

No levantamento realizado por Placido e Cunha (2010) é possível observar que a maior frequência de inundações registradas (96) foi no ponto 3, ou seja no rio Quitandinha, na altura da Volkswagen na Rua Coronel Veiga. Além deste ponto, mais dois pontos no rio Quitandinha se destacam pelo alto percentual de alagamentos, os pontos 4 e 5, com 80 casos em ambos os pontos. Nestes registros constata-se a vulnerabilidade do município, em especial na região central de Petrópolis, onde houve a mudança do curso do rio Quitandinha.

Figura 7 - Área urbana na bacia do rio Quitandinha, entre 1966 e 2008 e a indicação dos 15 locais mais críticos pelas inundações.



Fonte: PLACIDO e CUNHA, 2010

Observa-se que houve um considerável aumento da área urbanizada em 40 anos e as consequências dessa urbanização desorganizada são sentidas até hoje na cidade. Pois com o aumento das áreas impermeáveis a ocorrência de inundações urbanas tende a se intensificar, tal como chegou ao ponto da ocorrência do maior desastre ambiental do Brasil no verão de 2011.

Sendo assim, é possível afirmar que a falta de uma política de monitoramento e controle das inundações têm aumentado os prejuízos e perdas nas cidades, ocasionados pela falta de planejamento do espaço ocupado, conhecimento do risco das áreas passíveis à inundação e interesse na solução desse problema de acordo com da Hora (2009).

Em 2015, o Brasil assumiu um compromisso junto aos Estados-membros da Organização das Nações Unidas (ONU) em tomar medidas transformadoras para colocar o mundo em um caminho sustentável até 2030: Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Esta agenda engloba 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que orienta uma visão universal, integrada e transformadora para um mundo melhor. Nesse sentido, alcançar o ODS 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis, que é tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis, através do planejamento, da construção e da gestão dos espaços urbanos, adotando e implementando políticas e planos integrados para melhoria da eficiência dos recursos, mitigação e adaptação à mudança do clima, a resiliência a desastres; e desenvolver e implementar o gerenciamento holístico do risco de desastres (BRASIL, 2017).

A redução dos impactos e perdas decorrentes de eventos extremos de cheias se relaciona com o desenvolvimento de técnicas que permitam a previsão com antecedência suficiente para tomada de decisões (RIBEIRO NETO et al., 2016). Portanto, o desenvolvimento de ferramentas de previsão de mancha de inundação pode ajudar no planejamento da cidade e nas ações de contingenciamento diante a este fenômeno.

Medidas não estruturais de controle de inundações, tais como as ações de regulamentação do uso e ocupação do solo, a educação ambiental e os sistemas de alerta e previsão de inundações são reconhecidas e aplicadas em muitas bacias hidrográficas, baseando-se nos resultados da modelagem hidráulico-hidrológica, que permite a criação de cenários com simulações de eventos extremos, possibilitando a avaliação das consequências com implantação dessas medidas de controle (DECINA e BRANDÃO, 2016; PONTES et al., 2017).

2.2. Modelos Hidráulico-hidrológicos

Modelos matemáticos são um conjunto de equações matemáticas que expressam fenômenos que em um sistema computacional são capazes de simular a realidade com uma determinada exatidão em um menor tempo de processamento do que manualmente (BASSANEZI, 2015).

Existem diversos tipos de modelos disponíveis, os quais de uma forma geral dividem-se em dois grandes grupos, com abordagens que se complementam na avaliação do comportamento hidráulico-hidrológico de uma bacia hidrográfica. O primeiro grupo abrange os modelos hidrológicos, que enfocam a representação das parcelas do ciclo hidrológico na escala da bacia, permitindo a correspondente simulação ou geração de vazões a partir de dados de precipitação. Quando a bacia é tomada em termos médios, esses modelos são ditos concentrados. Quando a diversidade espacial é considerada, estes modelos são chamados distribuídos. No segundo grupo, têm-se os modelos de escoamento, denominados mais especificamente, de hidrodinâmicos ou hidráulicos e respondem, principalmente, pelos escoamentos superficiais e na rede de canais. Em outras palavras, adotam, como referencial, a calha do rio, explorando, então, a interação dos processos que ocorrem nessa escala com os potenciais desdobramentos e impactos na escala da bacia hidrográfica (LOU, 2010).

Segundo Tucci (1998), os modelos podem ser classificados em conceitual ou empírico. Os modelos empíricos são baseados em análises estatísticas, pois utilizam funções sem nenhuma relação com os processos físicos envolvidos, como métodos de correlação e análise de regressão, por exemplo. Já os modelos conceituais levam em consideração os conceitos físicos relacionados aos processos hidrológicos, como infiltração do solo, escoamento superficial, vazão, entre outros. Portanto, os modelos de base física utilizam as principais equações diferenciais do sistema físico, uma vez que seus parâmetros se aproximam da física do sistema, com o intuito de representar o mais autêntico possível os processos hidrológicos.

Os modelos hidrológicos procuram simular o percurso da água desde a precipitação até sua saída no exultório da unidade de análise, a bacia hidrográfica, seja por escoamento para fora da bacia, seja por evapotranspiração (RENNÓ, 2003). Muitos modelos hidrológicos foram desenvolvidos com representações simplificadas dos processos que ocorrem na natureza, já outros são de maior complexidade, com maior detalhamento dos processos hidrológicos envolvidos. Porém, em geral, todos tentam descrever a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação e evaporação, processos de infiltração, o escoamento superficial e subsuperficial no solo e nos canais (ANDRADE, 2017).

Nesse sentido, tem crescido o desenvolvimento e o uso de ferramentas de modelagem hidráulica-hidrológica por modelos de bases físicas que contribuem de maneira satisfatória na determinação de áreas potencialmente inundáveis, das vazões de longas recorrências e até mesmo na criação de sistemas de alerta de cheias (DECINA, 2012; ANDRADE, 2017). Alguns modelos têm sido mais adotados e pesquisados para simulação ou previsão de cenários de inundação em importantes rios por todo mundo, tais como MIKE SHE, DELFT e HEC-HMS/HEC-RAS.

O modelo MIKE SHE é um modelo hidrológico de uma versão adaptada do modelo SHE (Sistema Hidrológico Europeu), iniciado em 1976, através de uma cooperação de alguns centros de pesquisa europeus (ABBOTT et al., 1986; DHI, 2001). Segundo COLLISCHONN (2001), todos os processos são descritos por equações que simulam a compreensão teórica atual e a disponibilidade de dados. Sendo assim, os escoamentos são representados pela equação tridimensional do fluxo subterrâneo para a zona saturada, equação unidimensional de Saint-Venant para o escoamento nos canais, equação bidimensional de Saint-Venant para escoamento superficial e equação unidimensional de Richards para a zona não saturada. Além destas, o modelo possui outras possibilidades de cálculos.

Este modelo já foi aplicado, por exemplo, na bacia do rio Gete na Bélgica, com área de 600 km². Para sua calibração foram adotados dados diários de vazão no período de dois anos, já para sua validação, adotaram-se os dados no período de dois anos posteriores aos dados de calibração, ao final as vazões foram simuladas com sucesso em ambos os períodos (FEYEN et al., 2000).

O modelo MIKE SHE foi também aplicado à bacia hidrográfica do riacho Mimoso, em Pernambuco, com o objetivo de transformar chuva em vazão na bacia estudada (GÓES et al., 2005). Pois, uma bacia hidrográfica pode ser imaginada como um sistema que transforma chuva em vazão. A transformação envolve modificações no volume total da água, já que parte da chuva infiltra no solo e pode retornar à atmosfera por evapotranspiração, e modificações no tempo de ocorrência, já que existe um atraso na ocorrência da vazão em relação ao tempo de ocorrência da chuva (LIMA NETO, 2019).

Pelos resultados observou-se que o modelo se apresentou como uma ferramenta bastante satisfatória, pois a vazão simulada foi condizente com a vazão de referência da região do Alto Capibaribe (GÓES et al., 2005).

As fortes chuvas em novembro de 1994 provocaram grandes enchentes e estragos na região urbana que margeia a foz do rio Var na França. Esse evento hidrológico foi considerado um dos mais significativos da região. HYDROPROTECH (2001) realizou um estudo de caso sobre esse evento e adotou o modelo MIKE SHE para simulação do evento. O modelo produziu de forma realística a situação hidrológica na bacia estudada, onde foi estimado uma vazão de pico de $3.500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ na foz do rio.

O modelo MIKE SHE foi aplicado em uma área urbana da região sudeste da Ásia e se mostrou capaz de simular adequadamente uma inundação, considerando os efeitos combinados de chuva e maré, além de diferentes taxas de infiltração e áreas pavimentadas (NIELSEN, 2006).

Por fim, este modelo foi aplicado no projeto FLOODRELIEF, que envolveu vários países da Europa, na bacia hidrográfica do rio Odra na Polônia. O modelo foi calibrado com sucesso e as inundações foram representadas de forma satisfatórias. Vale ressaltar que, o projeto em questão desenvolveu novas metodologias para previsão de inundações e permitiu que os resultados dos estudos fossem abertos aos gerentes e pessoas que viviam em áreas de risco (BUTTS et al., 2005).

Outro modelo amplamente utilizado para estudar estuários e zonas costeiras é o DELFT, que é um modelo que oferece modelagem tridimensional, pois oferece modelos de ondas marinhas com interferência de ventos e transporte de sedimentos (DELTARES, 2010).

O Delft3D foi desenvolvido pela empresa Deltares, assim como o SOBEK, outro software de modelagem. Em uma integração dos modelos Delft3D e do SOBEK, foi gerado o modelo Delft3D FM, com inclusão de novos recursos e uma dinâmica que trabalha estes pacotes por meio de grades flexíveis (DELTARES, 2010).

Esse novo modelo, o Delft3D FM, pode simular a interação da água, dos sedimentos e da qualidade da água no tempo e no espaço. É usada para a modelagem de ambientes naturais, como áreas costeiras, estuarinas, lagos e rios, mas também pode ser usada para áreas urbanas (DELTARES, 2010).

No estudo publicado por Carvalho (2017), o software delft3D foi aplicado para analisar as características hidrodinâmicas no estuário da cidade de Lima, Portugal. No estudo foram confeccionadas modelagem bi e tridimensionais com a introdução dos valores de vazão. As condições de contorno a jusante, a maré instantânea e a montante, além da média diária da vazão foram utilizadas como parâmetros de entrada do modelo.

Em Moghaddam (2018), foi comparado os modelos MIKE 21 FM e o delft3D para um evento extremo de inundação do rio Bow, no Canadá, através de modelagem bidimensional. Foram utilizados os seguintes parâmetros de entrada: condições de contorno, descarga a montante e nível da água, além do remanso por afluentes no deságue. O resultado mais satisfatório foi do modelo MIKE 21 FM, apesar do delft3D apresentar resultados significativos. Em outra comparação dos mesmos modelos, com a inclusão do modelo delft3D FM, foi realizada modelagens em um estuário no porto Oeste em Meulbourne, Austrália, sendo todos os modelos foram considerados com resultados satisfatórios.

Um outro modelo hidráulico-hidrológico muito adotado no Brasil e no mundo é a combinação dos Sistema de Modelagem Hidrológica (HEC-HMS - *Hydrologic Modeling System*) com Sistema de Análises de Rios (HEC-RAS - *River Analysis System*), que é o modelo hidráulico. Ambos são softwares livres, de domínio público, constantemente aperfeiçoados e desenvolvidos pelo Centro Hidrológico de Engenharia (HEC - *Hydrologic Engineer Center*), que é uma organização dentro do Instituto de Recursos Hídricos dos Estados Unidos (HEC, 1995; CAMPOS, 2009; US ACE, 2016).

A interface simples e dinâmica destes modelos, juntamente com as diferentes possibilidades de simulações hidrológicas, faz com que eles sejam amplamente utilizados no meio acadêmico em trabalhos de análises de recursos hídricos e mapeamento de áreas vulneráveis a inundações. Além disso, utilizam Sistemas Integrados de Geoprocessamento (SIG) para determinação dos parâmetros necessários às simulações (ANDRADE, 2017) e podem fornecer informações precisas e úteis para estudos relacionados a inundações (AHRENS e MAIDMENT, 1999; ANDERSON et al., 2002). Neste contexto, segundo Santos et al. (2006) a interação de um SIG e modelos de simulação dos processos de evaporação, precipitação e escoamento, permite efetuar a previsão do escoamento superficial e simultaneamente analisar a sua distribuição espacial numa bacia hidrográfica.

Diversas pesquisas têm sido realizadas utilizando os modelos HEC-HMS e HEC-RAS para mapear inundações de bacias hidrográficas brasileiras. Costa (2002) aplicou modelagem da inundação para os rios da bacia de Colatina, no Espírito Santo; Decina (2012) realizou um estudo hidrológico e hidrodinâmico da bacia hidrográfica do Gregório, em São Paulo; Santos (2015) realizou estudos hidráulico-hidrológicos na bacia hidrográfica Ribeirão Anicuns, em Goiás, a fim de elaborar um mapa de inundação; Decina e Brandão (2016) realizaram simulações hidrológicas e hidráulicas, obtendo diferentes manchas de inundação para os períodos de retorno de 25, 50 e 100 anos na bacia do Córrego Gregório em São Carlos- SP. Por fim, Correa (2017) elaborou um mapa de inundação para a bacia do rio Cachoeira de Macacu, no Rio de Janeiro.

Knebl (2005) aplicou a modelagem hidráulica-hidrológica com os modelos HEC-HMS e HEC-RAS na bacia do rio San Antonio no Texas, Estados Unidos, para modelar uma grande inundação que ocorreu no verão de 2002. Nharo (2019) também aplicou esses modelos na bacia do médio Zambezi, no Zimbábue, para investigar as causas e os impactos das inundações no distrito de Mbire, mapeando as inundações para o período de 2005 a 2015 na bacia do rio. Os resultados obtidos poderão contribuir para definição de novas estratégias para o gerenciamento imediato dos riscos de inundações no Distrito.

Nithila Devi (2019) e Suriya (2012) usaram os modelos HEC-HMS e HEC-RAS para modelar inundações na cidade de Chennai, Índia. O primeiro tinha o objetivo de

simular o evento de inundação ocorrido em 2015 na bacia do rio Adyar, a fim de prever eventos semelhantes no futuro. Já o segundo, aplicou o modelo na bacia Thirusoolam, com o intuito de ilustrar a relação entre uso da terra e resposta a mudanças no escoamento, para desenvolver o mapa de risco de inundação na região. Todos tiveram resultados significativos e puderam contribuir para as diretrizes das políticas públicas.

Como os modelos HEC-HMS e HEC-RAS foram também adotados neste estudo, estes serão apresentados com mais detalhes nas seções 2.2.1 e 2.2.2.

2.2.1. HEC-HMS

O HEC-HMS foi projetado com a finalidade de simular os processos chuva-deflúvio em bacias hidrográficas dendríticas através da separação do ciclo hidrológico em diferentes processos. O resultado do processamento é a variação da vazão ao longo do tempo em uma seção do curso d'água, ou seja, um hidrograma, que pode ser utilizado para diversos estudos, como por exemplo para redução de prejuízos associados a inundações, disponibilidade hídrica, drenagem urbana, previsão de vazões, impactos de urbanização e outros (CAMPOS, 2009; US ACE, 2016).

O HEC-HMS inclui muitos procedimentos tradicionais de análise hidrológica, tais como infiltração, hidrogramas unitários e roteamento hidrológico. Inclui também procedimentos necessários para a simulação contínua, como a evapotranspiração, o degelo, e a contabilidade de umidade do solo. Ferramentas complementares de análise são fornecidas para otimização de modelos, tais como, fluxo de vazão prevista, redução da relação profundidade-área, avaliação da incerteza do modelo, transporte de sedimentos, erosão e qualidade da água (US ACE, 2016).

Para simulação do escoamento superficial em uma bacia, o HMS requer pelo menos quatro módulos de entrada de dados: representação da bacia (*basin model*), modelo meteorológico (*precipitation model*), especificações de controle (*control specification*) e módulo de séries temporais (*time-series model*). Esses módulos necessitam de informações de entrada como características geomorfológicas da bacia

hidrográfica, suas condições de impermeabilização, suas condições de impermeabilização, tempo de concentração, as precipitações de projeto, entre outros.

O módulo de representação da bacia relaciona-se à configuração geométrica da bacia, sendo representado o esquema hidrológico da área, com as sub-bacias, os trechos de rios, possíveis reservatórios, junções e divisões dos canais (CAMARGO et al., 2011). Para a representação da bacia o modelo possui uma importante ferramenta de hidrologia geoespacial, a Extensão de Modelação Hidrológica Geoespacial (HEC-GeoHMS - *Geospatial Hydrologic Modeling Extension*), que utiliza o SIG, mas especificamente pelo software comercial ArcGis, para elaborar os dados morfométricos da bacia hidrográfica, como por exemplo, o Modelo Digital do Terreno (MDT), transformando as vias de drenagem e limites das bacias hidrográficas em uma estrutura de dados hidrológicos que representam a rede de drenagem. Esta informação permite aos usuários visualizar informações espaciais, características das bacias hidrográficas, assim como realizar análise espacial, e delimitar sub-bacias e rios (HEC, 2014; ESRI, 2014; US ACE, 2016).

Segundo Cysne (2004), os SIG's podem ser definidos como ferramentas de armazenamento, manipulação e análise de fenômenos geográficos. O SIG é um conjunto de tecnologias integradas que buscam coletar, tratar, transformar, manipular, modelar, atualizar, além de proporcionar uma análise e exibição de informações topologicamente estruturadas em diversas áreas do conhecimento, como por exemplo, na área ambiental (NUNES, 2015; ROCHA, 2000; MARTINELLI, 2007). Logo, para modelagem hidrológica, um SIG possibilita pré-processar diversos dados geográficos, a fim de serem utilizados como entrada para modelos hidrológicos (CHOI E DEAL, 2008).

Para elaboração do MDT se faz necessário a aquisição dos dados fisiográficos da bacia, que são todos aqueles que podem ser extraídos de mapas, fotografias aéreas e imagens de satélite ou in loco. Estes dados podem ser representados como áreas, comprimentos, declividades e coberturas do solo obtidos diretamente ou expressos por índice (TUCCI, 2005).

No pacote HEC-HMS é disponibilizado diferentes métodos para estimar a precipitação pluviométrica e diferentes opções para simular a transformação da precipitação excedente em escoamento superficial. Ele tem como saída hidrogramas

que podem fornecer informações muito úteis para uma análise da bacia hidrográfica e também fornecer dados de entrada para o modelo HEC-RAS (ZOPE; ELDHO; JOTHIPRAKASH, 2012).

2.2.2. HEC-RAS

O modelo HEC-RAS é um sistema que pode estimar fluxo hidráulico contínuo unidimensional ou bidimensional, muito utilizado para auxiliar os engenheiros na determinação de planícies de inundação. O software contém vários componentes de análise fluvial para cálculos de perfil de superfície de água, tanto em regime permanente; podendo modelar os fluxos subcrítico, supercrítico e misto para fluxos consistidos em uma rede cheia de canais, quanto em regime não permanente (HEC, 1995; US ACE, 2016).

O HEC-RAS 2D foi projetado para realizar cálculos hidráulicos bidimensionais em uma rede completa de canais naturais e construídos (US ACE, 2016). Para a modelagem de inundação é comum representar o canal do rio em uma dimensão e a planície de inundação de maneira bidimensional. Já o HEC-RAS 1D (unidimensional) só pode ser usado em rios com declives menores do que 10% (HEC, 2010). De acordo com Fernandez et al. (2013), a maior limitação apresentada pelo modelo HEC-RAS 1D é o fato deste oferecer caráter unidimensional, mantendo a cota da superfície livre constante nas seções transversais da linha de água, tendo como resultado irregularidades acentuadas.

Basicamente, existem três tipos de simulação disponíveis para o modelo do HEC-RAS 1D: regime permanente, regime transiente e regime misto. Para o caso de uma simulação de regime permanente, esta é calculada pela equação de energia ou continuidade (Equação 1), enquanto para os outros dois, a equação escolhida é a equação do momento (Equação 2). Independente da metodologia utilizada para o cálculo da vazão, a perda de carga no sistema é calculada através da equação de Manning (Equação 3). Portanto, a base computacional do modelo unidimensional apoia-

se na solução das equações de Saint Venant (HEC, 1995; HEC, 2010; MELO et al., 2013; US ACE, 2016; LIMA NETO, 2019).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (\text{Equação 1})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA(S_f - S_0) = 0 \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

A – área da seção transversal molhada (m^2),

t – tempo (s),

Q – vazão ($\text{m}^3 \text{ s}$),

x – distância na direção do fluxo principal (m),

q – vazão de contribuição lateral por unidade de comprimento $\text{m}^2 \text{ s}$,

g – aceleração da gravidade (m s^{-2}),

y – profundidade da água (m),

S_f – declividade da linha de energia ($\text{m}^{-1} \text{ m}$),

S_0 – declividade média de fundo ($\text{m}^{-1} \text{ m}$).

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m_5 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

n - coeficiente de rugosidade de Manning

n_0 - valor base para um canal uniforme, reto e liso;

n_1 - valor adicionado a n_0 para corrigir o efeito das irregularidades superficiais;

n_2 - valor para variações na forma e tamanho da seção transversal,

n_3 – valor para obstruções;

n_4 – valor para as condições de vegetação e fluxo,

m_5 - valor para a correção de meandros.

Os valores de n_0 a m_5 geralmente são encontrados facilmente na literatura e muitas vezes tabelados, assim como o próprio coeficiente de Manning.

O HEC-RAS a partir da versão 5.0 inseriu ferramentas para modelagem hidrodinâmica bidimensional nas simulações de escoamentos transientes (HEC, 2010). A rotina de cálculos do modelo 2D pode executar o escoamento unidimensional, o bidimensional ou uma análise combinada dos dois.

Segundo US ACE (2016), o modelo 2D é capaz de resolver problemas computacionais complexos em menos tempo que os métodos explícitos, onde se obtém maior estabilidade e robustez no processamento de problemas hidrodinâmicos bidimensionais. Para tal, o modelo resolve as equações de Saint Venant para duas dimensões (Equações 4 a 6).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + h \frac{\partial v}{\partial y} = q_L \quad (\text{Equação 4})$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + h \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_{0x} - S_{fx}) \quad (\text{Equação 5})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} = g(S_{0y} - S_{fy}) \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

t - tempo (s);

x - variável do escoamento na direção do eixo x (m);

y - variável do escoamento na direção do eixo y (m);

u - velocidade média do escoamento na direção x ($m s^{-1}$);

v - velocidade média do escoamento na direção y ($m s^{-1}$);

q_L - contribuição de vazão lateral ($m^3 s^{-1}$);

g - aceleração da gravidade ($m^2 s^{-1}$);

h - altura da lâmina d'água (m);

S_{0x} e S_{0y} - declividades do leito do rio nas direções x e y, respectivamente ($m m^{-1}$);

S_{fx} e S_{fy} - inclinações das linhas de energia nas direções x e y, respectivamente ($m\ m^{-1}$).

O mapeamento das áreas inundáveis se dá a partir dos resultados obtidos pelas simulações hidráulicas no HEC-RAS 2D. Para tal, o modelo conta com a extensão de Análise Geoespacial do Rio (HEC-GeoRAS - *Geospatial River Analysis Extension*), que é um conjunto de ferramentas, procedimentos e utilitários para os processos de pré e pós-processamento de dados geoespaciais vinculadas ao software ArcGIS (ANDRADE, 2017; LIMA NETO, 2019).

Por meio do modelo digital de terreno (MDT) e das alturas d'água, o HEC-GeoRAS determina os limites e profundidades das inundações, que, posteriormente passam por uma interpretação detalhada para identificar a proximidade do ambiente real (LIMA NETO e TAVARES, 2013). Logo, a qualidade dos dados de terreno pode ser um fator limitante para a performance do modelo hidráulico. Portanto, é fundamental que se tenha um MDT representativo das geometrias da calha do rio e da planície de inundação.

Após toda a estruturação dos parâmetros definidos no HEC-RAS, os resultados das simulações são exportados para o HEC-GeoRAS fornecendo informações da lâmina d'água. Em seguida, essas simulações são importadas novamente no HEC-GeoRAS, a fim de ter a simulação e definição das áreas inundadas na bacia hidrográfica (ANDRADE, 2017; LIMA NETO, 2019). Logo, a interface do HEC-GeoRAS permite a preparação de dados geométricos para importação no HEC-RAS e os resultados de simulação de processos do HEC-RAS podem ser exportados de volta (US ACE, 2016).

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento do presente trabalho pretende integrar o SIG com modelos hidrológicos (HEC-HMS) e hidráulicos (HEC-RAS) aplicados a bacia do rio Quitandinha, na cidade de Petrópolis, na região Serrana do Rio de Janeiro, a fim de simular a mancha de inundação de um evento hidrometeorológico neste rio na região central do município, onde houve alteração do curso natural do rio Quitandinha, de maneira geral, a estrutura da metodologia está dividida por quatro seções, conforme a Tabela 2.

. Tabela 2 - Fluxograma da metodologia adotada para a modelagem hidráulica-hidrológica



Fonte: O autor, 2021.

No entanto, para que tais modelos possam representar de forma realística os processos que ocorrem desde a precipitação até o mapeamento de áreas suscetíveis a inundação em determinada região, são necessárias à estimação ou o levantamento de vários parâmetros e dados confiáveis.

Segundo MONTE et al. (2016), os principais fatores hidrológico-hidráulicos naturais que propiciam as inundações são o relevo, tipo e intensidade da precipitação, cobertura vegetal, capacidade de drenagem, geologia, morfologia fluvial, extensão do canal e da planície de inundação, além da interação canal planície de inundação e rugosidade.

Além da modelagem hidráulica-hidrológica, foi feito preliminarmente uma análise do comportamento hidrometeorológico da região da bacia do rio Quitandinha, a fim de conhecer o regime das chuvas e o comportamento do rio frente as mesmas. No intuito de aumentar a sensibilidade analítica quanto aos resultados da modelagem que serão gerados na região.

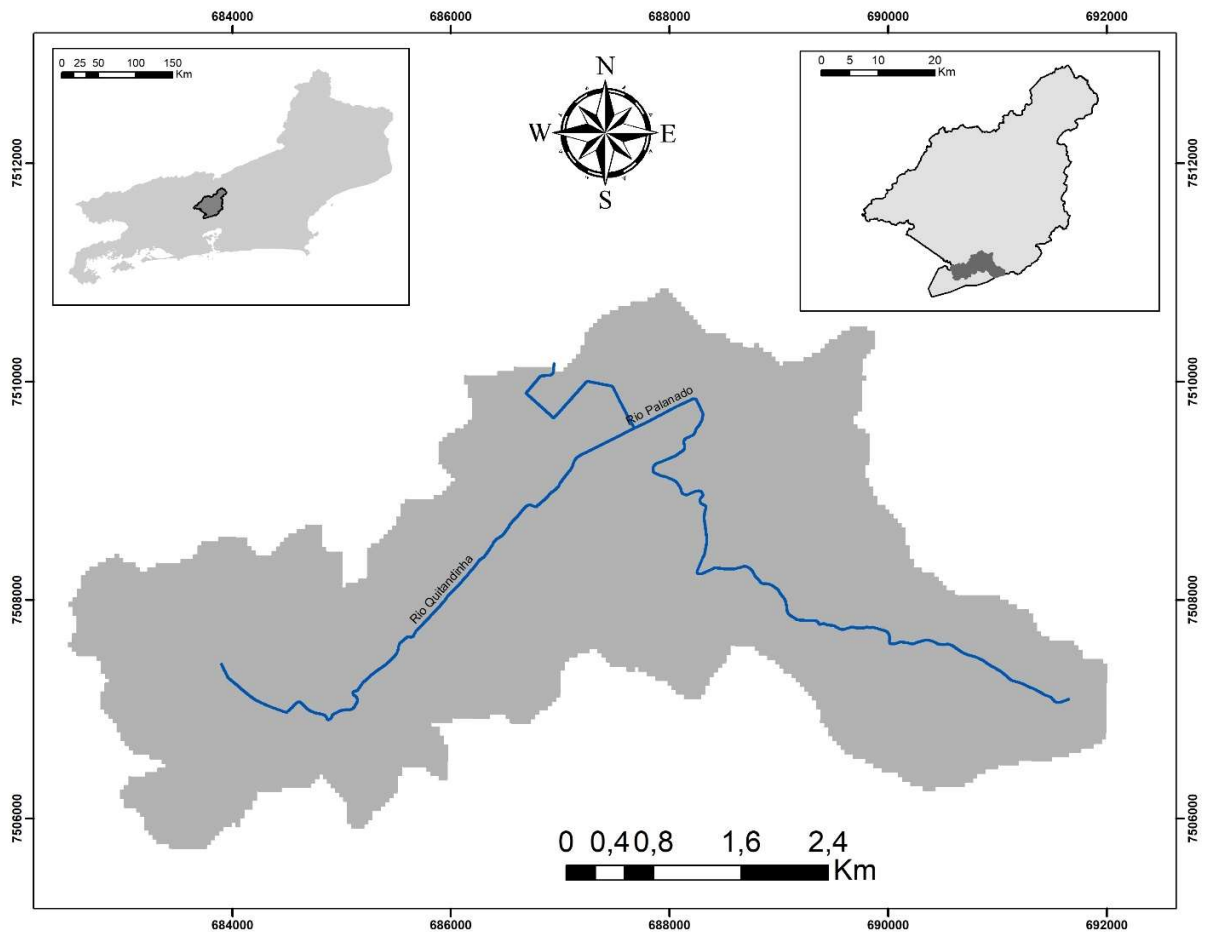
3.1. Área de estudo

A cidade de Petrópolis situa-se a 60 km da capital do Rio de Janeiro, ocupando uma área de 12,81 km², onde vivem mais de 80 mil pessoas (IBGE, 2010). A cidade está na RSRJ, a 850m de altitude em média, com íngremes declives, variando de 30 ° a 90 °, com localização entre 43°04' – 43°14' de longitude Oeste e 22°33' – 22°35' de latitude Sul, no alto da Serra do Mar (GUERRA, 1995; GUERRA et al., 2007 ; IBGE, 2010; DA SILVA et al., 2016).

Em relação ao clima regional, é considerado mesotérmico, úmido com verões amenos, com temperaturas médias de 19 °C, denominados clima tropical de altitude. Além disso, registra uma precipitação anual média de 1929 mm, mantendo o solo saturado e com uma alta condutividade hidráulica (ALVARES et al. 2013; CLIMATE-DATA 2019).

A região de interesse alvo deste estudo é a região central da cidade de Petrópolis, onde sofreu alteração do curso do rio Quitandinha, ou seja, a bacia do rio Quitandinha (Figura 8). Pois, segundo Placido e Cunha (2010), os bairros que fazem parte desta bacia vêm sofrendo com as enchentes cada vez mais frequentes na época de verão. De acordo com alguns pesquisadores TAO e BARROS, 2013; KVOCKA et al., 2017), bacias hidrográficas montanhosas ou com altas declividades produzem inundações mais frequentes com períodos menores que bacias menos íngremes.

Figura 8 - Mapa de localização da área de estudo: Mapa da bacia do Quitandinha detalhando também o curso do rio Quitandinha assim como o rio Palatinado.



Nota: Mapa dezembro de 2020 / Datum: Sirgas 2000.

Fonte: O autor, 2021

Na região central da cidade de Petrópolis se destacam três importantes rios, o Palatinado, o Piabanhas e o Quitandinha. Este último é o segundo mais importante rio desta região, onde sua nascente está localizada na vertente norte da Serra do Mar, a 960 m de altitude, próxima ao lago do hotel Quitandinha, com 7,5 km de extensão. Este

rio desemboca no rio Piabanha, que é o mais importante da região, pois é um dos afluentes do rio Paraíba do Sul, o qual é o principal manancial do estado do Rio de Janeiro (IBGE, 2019). Já o rio Palatinado é aquele que se encontra frontalmente com o rio Quitandinha.

Na margem direita do rio Quitandinha encontra-se a Rua Coronel Veiga, que liga o Rio de Janeiro a Juiz de Fora. E na margem esquerda localizam-se muitas residências e estabelecimentos comerciais, nos quais estes ao longo do tempo aumentaram seus terrenos e estreitaram ainda mais a calha do rio.

3.2. Diagnóstico das inundações na bacia do rio Quitandinha

Para se realizar um diagnóstico consolidado sobre as inundações na região central de Petrópolis-RJ, neste estudo foram adotados os dados de precipitação de estações localizadas na bacia do rio Quitandinha e os dados fluviométricos de dois pontos de monitoramento no rio Quitandinha (Cel. Veiga e Centro), descritos na Tabela 3.

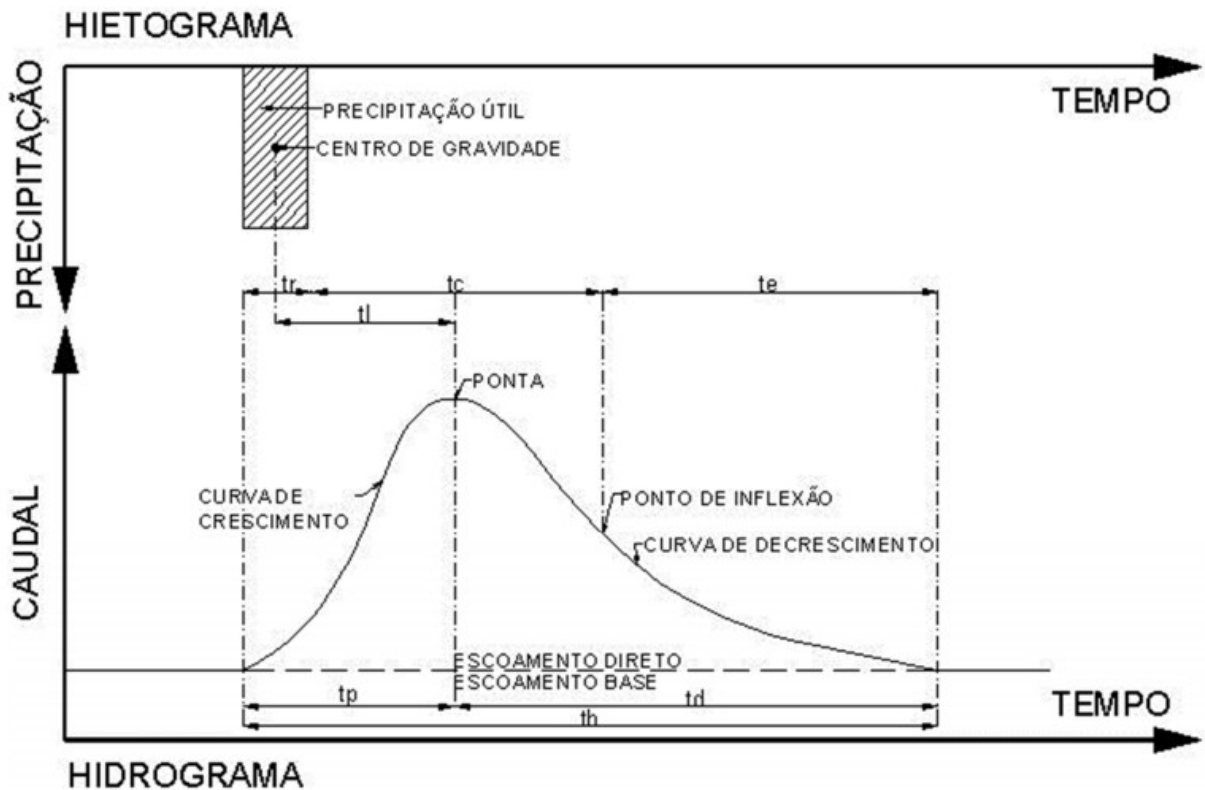
Tabela 3 - Estações de monitoramento hidrometeorológico

Estação de monitoramento	Tipo de Monitoramento	Coordenadas (Lat / Long)
Quitandinha	Pluviométrico	22° 31' 11" / 43° 12' 46"
LNCC	Pluviométrico	22° 31' 49" / 43° 13' 02"
Independência	Pluviométrico	22° 32' 52" / 43° 12' 32"
Coronel Veiga	Pluviométrico e Fluviométrico	22° 31' 34.7" / 43° 11' 37.6"
Centro	Pluviométrico e Fluviométrico	22° 30' 44.89" / 43° 10' 49.01"
Alto da Serra	Pluviométrico e Fluviométrico	22° 30' 45" / 43° 10' 20"
Morin	Pluviométrico	22° 29' 25" / 43° 11' 07"

Fonte: Adaptado INEA, 2019

Foram construídos histogramas de precipitação média mensal do período de 2011 a 2018 com os dados de todas as 7 estações de monitoramento pluviométricas da bacia do rio Quitandinha, com o intuito de verificar o regime pluviométrico da região. Além disso, foram elaborados hidrogramas do rio Quitandinha para análise das ondas de cheia com os dados das estações Cel. Veiga e Centro para os meses do verão de 2017, a fim de monitorar a relação das chuvas com a elevação do nível do rio, de acordo com o método proposto por Lencastre e Franco, 1984 (Figura 9).

Figura 9 - Características de um hidrograma



Fonte: Adaptado de Rodrigues et al., 2011.

Onde:

T_r - Tempo de precipitação;

T_p - Tempo de crescimento, corresponde ao aumento caudal motivado pelo incremento do escoamento até o alcance do valor máximo do escoamento direto, e que ocorre durante o tempo de decscimento ou tempo para a ponta (min);

Ti - Tempo de resposta, corresponde ao intervalo de tempo definido pelos instantes correspondentes ao centro de gravidade da precipitação útil e à ponta do hidrograma (min);

Tc - Tempo de concentração, corresponde ao tempo necessário para que toda a área da bacia hidrográfica contribua para o escoamento superficial na seção de saída (min);

Te - Tempo de esvaziamento, corresponde ao tempo que decorre entre a ocorrência do ponto de inflexão da curva de crescimento e a extinção do escoamento (min);

Td - Tempo de decrescimento, corresponde à diminuição progressiva do escoamento após o atingimento do valor máximo (min).

De acordo com Tucci (2005), a curva de crescimento corresponde ao aumento de caudal motivado pelo incremento do escoamento, durante o tp. Já a ponta do hidrograma representa o valor máximo do escoamento direto e a curva de decrescimento à diminuição progressiva do escoamento, que decorre durante o td. Por fim, a curva de esgotamento corresponde ao decréscimo exponencial do escoamento base, depois de terem cessado as contribuições das restantes componentes do escoamento superficial.

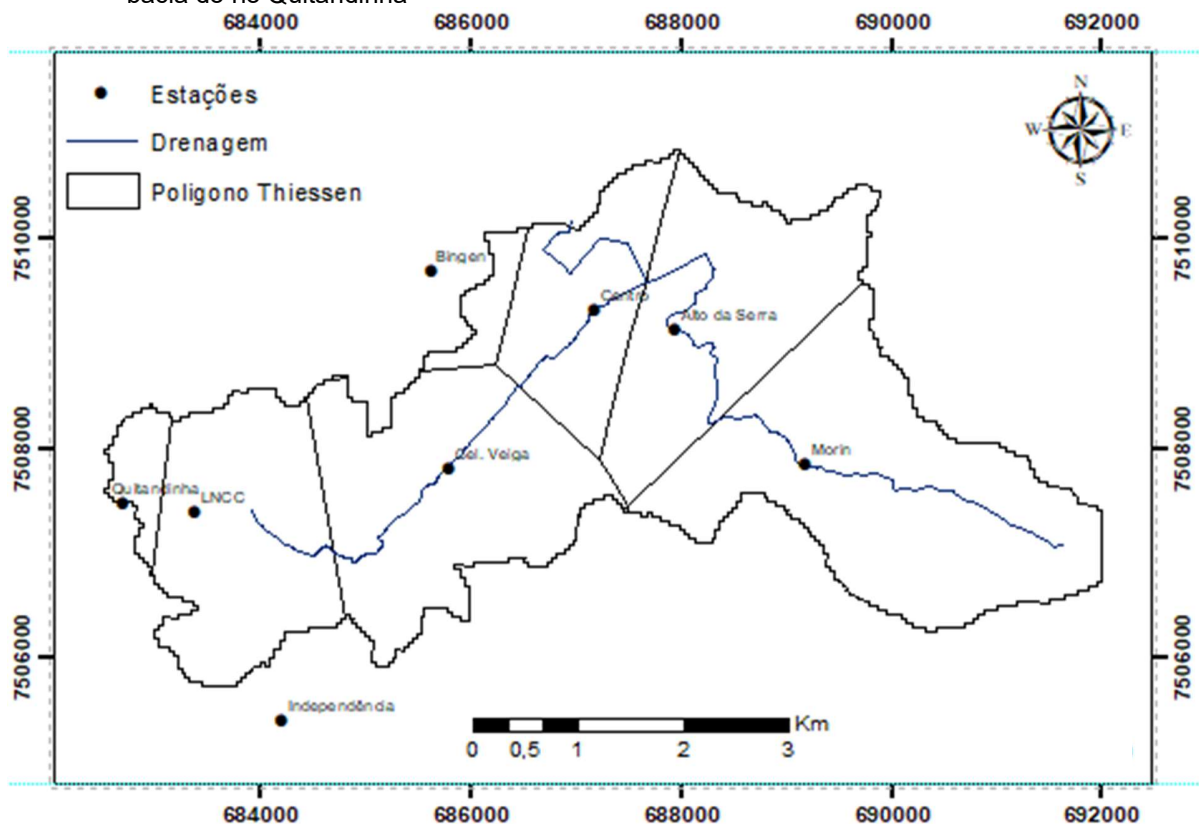
3.3. Dados de entrada dos modelos HEC-HMS e HEC-RAS

3.3.1. Dados hidrometeorológicos na bacia do rio Quitandinha

Neste estudo foram adotados os dados da série histórica de monitoramento de estações automáticas pluviométricas e fluviométricas na bacia hidrográfica do rio Quitandinha (Tabela 3) realizado pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA), desde 2011, ano de início do projeto Alerta de Cheias do órgão ambiental, até o ano de 2018.

As áreas de influência dos pluviômetros das estações serão determinadas através do Método de Thiessen (Figura 10). O método gera uma média ponderada dos dados registrados pelos pluviômetros, e segundo Tucci (1997), essa média é diretamente proporcional à área de influência da bacia, considerando a não uniformidade da distribuição espacial das estações, e não levando em conta o relevo da bacia. Esses dados ponderados irão alimentar a modelagem hidrometeorológica.

Figura 10 - Mapa com as áreas de influência das estações de acordo com o método de Thiessen na bacia do rio Quitandinha



Fonte: O autor, 2021

3.3.2. Curva de Nível

Para o estudo ser realizado foi necessária a aquisição de dados altimétricos da bacia hidrográfica do rio Quitandinha, sendo assim foi utilizado um arquivo de extensão

shapefile com levantamento altimétrico (Curvas de Nível) realizado pela concessionária de energia AMPLA na região central de Petrópolis. Este levantamento está na escala 1:10.000, com intervalo de 10 em 10 metros.

O ArcGis10.8 foi utilizado para processar o arquivo de curva de nível. Além disso, foi realizado um processo de filtragem e correção de erros, uma vez que, o arquivo continha inúmeras situações de linhas duplas, linhas descontinuas e quebras de linhas.

3.3.3. Modelo Digital do Terreno (MDT)

Após a correção dos erros, as curvas de níveis foram transformadas em um Modelo Digital do Terreno Hidrologicamente Consistido (MDT-HC), através da ferramenta *Topo To Raster* do ArcGis. O MDT é um arquivo de dados com valores de elevação do terreno associados, na forma de uma grade cúbica regular, que permite caracterizar a topografia das zonas inundáveis e da seção transversal das linhas de água com elevada resolução espacial (FERNANDEZ; MOURATO; MOREIRA, 2013).

Para geração do MDT-HC é feita uma interpolação das curvas de nível não só com os elementos cotados, mas também com a utilização da rede de drenagem, gerando uma interpolação mais próxima da real, pois abastece mais informações para o interpolador na qual muitas vezes não são obtidas de forma satisfatória nos levantamentos altimétricos (Labgis, 2015).

3.3.4. Determinação da bacia hidrográfica e microbacias

Para determinar a delimitação da bacia hidrográfica e suas microbacias foi utilizada a extensão HEC-GeoHMS e o ArcGis10.8. O HEC-GeoHMS agrega diversas ferramentas que auxiliam no pré-processamento da modelagem no HEC-HMS, tais

como as de correção do MDT, direção, acumulação e definição do fluxo, além da delimitação da bacia hidrográfica.

Para o processo realizado com o auxílio do HEC-GeoHMS foram adotadas as seguintes configurações (US ACE, 2016):

- a) *DEM Reconditioning* - a qual utiliza um arquivo de drenagem pré-existente, forçando a geração de uma rede de drenagem semelhante ao arquivo utilizado.
- b) *Fill Sinks* - como muitas depressões e falhas permanecem após a interpolação do MDT, essa função preencheu essas depressões (*sinks*) e também retirou elevações abruptas (*peaks*).
- c) *Flow Direction* - calcula a direção do fluxo superficial do escoamento na bacia hidrográfica, atribuindo valores para cada uma das oito direções possíveis (norte, sul, leste, oeste, nordeste, noroeste, sudeste e sudoeste).
- d) *Flow Accumulation* - identifica a acumulação de fluxo à montante, com a geração de fluxo acumulado para cada célula da matriz.
- e) *Stream Definition* - identifica a rede de drenagem na bacia, quanto mais detalhada, maior o número de sub-bacias geradas.
- f) *Stream Segmentation* - divide a grade de fluxo em segmentos, estes são as seções de um fluxo que conectam duas junções sucessivas, uma junção a uma saída ou uma junção a uma divisão de drenagem.
- g) *Catchment Grid Delineation* - identifica cada segmento, uma sub-bacia ou uma microbacia.
- h) *Adjoint Cathment Processing* - agrega a montante em cada confluência as microbacias.

Após a determinação das sub-bacias e a rede de drenagem, foi feito arquivo de extensão compatível com o HEC-HMS para exportar essas informações para o programa.

3.3.5. Determinação dos dados físicos da bacia hidrográfica

Segundo Morisawa (1968), alguns parâmetros referentes à morfometria da bacia podem explicar características da bacia que as fazem mais suscetíveis às enchentes e inundações, como por exemplo, o coeficiente de compacidade, o índice de circularidade, fator de forma, densidade da drenagem e o tempo de concentração. Estes índices refletem a influência da geologia, topografia, do solo, da vegetação e da ação antrópica na bacia hidrográfica. Sendo assim, as mudanças nas características físicas das bacias podem alterar os valores dos parâmetros, tendo as medidas de campo como forma de avaliação.

Neste sentido, após a exportação do projeto realizado no HEC-GeoHMS para o HEC-HMS, se fez necessário obter dados físicos da bacia, tais como: tempo de concentração da bacia, *lag time*, declividade, comprimento do rio principal das sub-bacias, área das sub-bacias, dados pedológicos da bacia, dados quanto ao uso e ocupação do solo e parâmetro *Curve Number (CN)* do *Soil Conservation Service (SCS)* para alimentar o modelo.

O tempo de concentração das sub-bacias foram identificados através da Equação *California Culverts Practice* (Equação 7).

$$t_c = 57 \left(\frac{L^3}{\Delta h} \right)^{0,385} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

t_c – tempo de concentração (min)

L – comprimento do talvegue do curso d'água (km)

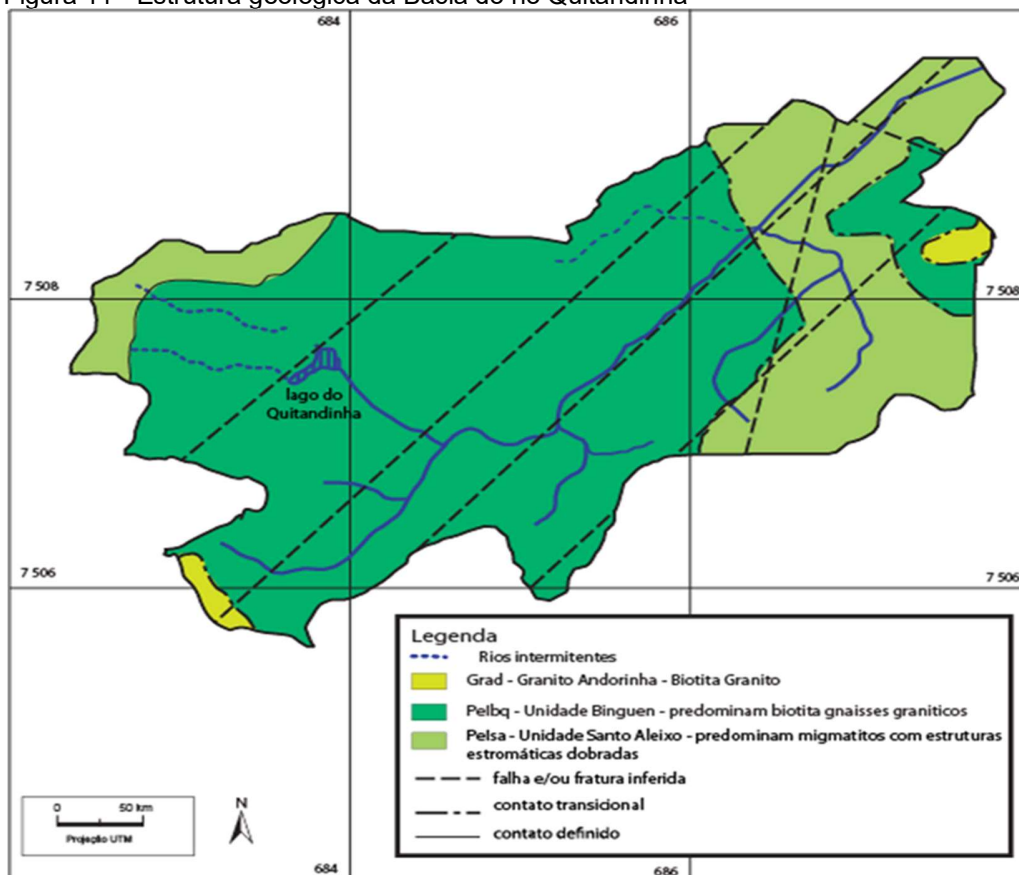
Δh – desnível do talvegue entre a seção e o ponto mais distante da bacia (m)

O tempo de concentração (t_c) é definido como o tempo necessário para que toda a área da bacia hidrográfica contribua para o escoamento superficial num determinado ponto de controle (ARAÚJO et al., 2011). Já o *Lag Time* (t_p) pode ser definido como o período de tempo entre o centróide da precipitação e o fluxo de pico do hidrograma resultante. Para obtenção desse parâmetro foi considerado o valor correspondente a 60% do valor encontrado para o tempo de concentração em cada

sub-bacia, de acordo com a equação indicada no relatório da USDA-SCS por Kent (1973).

Para os parâmetros declividade e comprimento do rio principal de cada sub-bacia, estes foram extraídos do MDT-HC. Em relação aos dados pedológicos da bacia foi possível verificar que a rede de drenagem da bacia do rio Quitandinha está condicionada à estrutura geológica da bacia (Figura 11).

Figura 11 - Estrutura geológica da Bacia do rio Quitandinha



Fonte: PLACIDO E CUNHA, 2010.

As falhas e/ou fraturas condicionam a rede de drenagem. Logo, podemos observar a predominância de biotita, gnaisses e granitos da unidade Bingen, além de migmatitos da unidade Santo Aleixo na Figura 11.

O local se caracteriza por um terreno acidentado e presença de falhas extensas, fraturas e discontinuidades na camada de rocha impermeável (GUERRA, 1995; ROSI et al., 2019). O solo acima do leito rochoso não é muito espesso devido às

declividades íngremes, dificultando a formação de camadas profundas (GUERRA et al., 2007).

De acordo com o mapa de solos do estado do Rio de Janeiro constante no relatório elaborado pelo Ministério da Agricultura e Abastecimento (2000) foi possível identificar e classificar o solo, onde a bacia do rio Quitandinha está localizada, como Latossolo Vermelho-Amarelo.

3.3.6. Uso do solo da bacia do rio Quitandinha

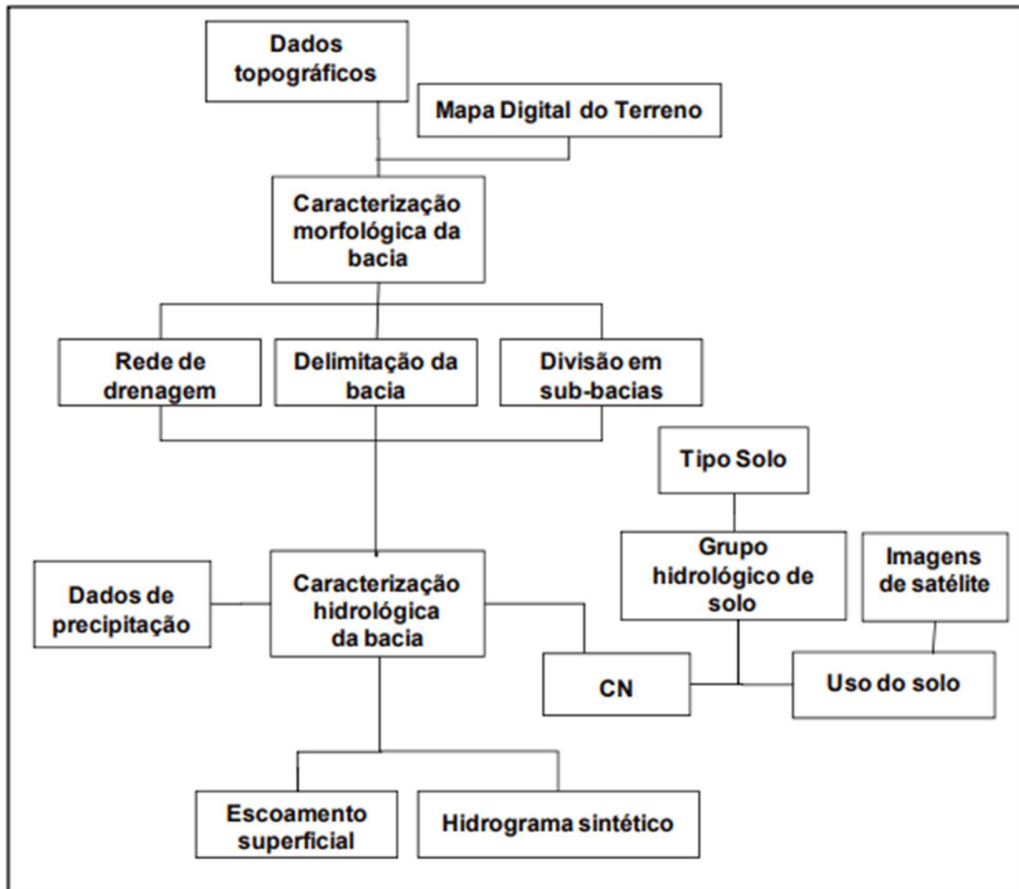
Com o auxílio da Ferramenta *Image Classification* do ArcGis e a imagem do satélite SENTINEL-2A do dia 30/09/2020 foi gerado o mapa de uso e ocupação do solo na bacia do Rio Quitandinha. Este mapa divide o uso e ocupação do solo nas seguintes classes: Rio, Água, Solo Exposto, Afloramento Rochoso, Área Urbanizada e Vegetação. Com essa classificação é possível estimar outros parâmetros necessários para as modelagens hidráulicas e hidrológicas.

A classificação do uso e ocupação do solo da bacia é fundamental para a modelagem hidráulica, afim de delimitar as áreas inundáveis. Desta forma, o mapeamento do uso do solo da bacia do rio Quitandinha foi associada ao MDT para a modelagem da mancha de inundação de um evento hidrometeorológico no ano de 2019.

3.4. **Simulação do modelo HEC-HMS**

O HEC-HMS requer alguns dados de entrada, tais como os dados de precipitação pluviométrica da bacia hidrográfica em estudo, assim como os dados da caracterização morfológica e do solo da bacia para a realização das simulações (SURIYA E MUDGAL, 2012; US ACE, 2016). A Figura 12 apresenta o fluxograma de processo de modelagem hidrológica detalhado.

Figura 12 - Fluxograma do processo de modelagem hidrológica utilizando o HEC-HMS.



Fonte: Adaptado de Hammouri & El-Naqa, 2007

Este sistema representado na Figura 12 permite simular eventos hidrometeorológicos desde a precipitação na bacia até a representação espacial das áreas provavelmente inundadas.

O termo simulação descreve os processos de uso de um modelo. As etapas que compõem esse procedimento são: a calibração e a validação. A calibração dos parâmetros é uma parte da simulação em que os parâmetros devem ser definidos. Já na validação, identifica-se a validade do modelo e da calibração com os parâmetros estimados, ou seja, verifica-se o quão fidedignos são os valores simulados frente aos observados (TUCCI, 2005).

3.4.1. Calibração do modelo HEC-HMS

A calibração busca a melhor solução para representar um determinado fenômeno, procuram-se valores de parâmetros que forneçam similaridade entre os valores calculados pelo modelo e os observados (MONTEIRO; KOBAYAMA; ZAMBRANO, 2015). Neste estudo, os dados de precipitação para alimentação do modelo foram os obtidos através do método de Thiessen, que usou os dados monitorados das estações pluviométricas do INEA (Tabela 3), que registraram as chuvas da bacia do rio Quitandinha.

A fim de simular a propagação da onda de cheia por trecho de rio, foi adotado o Método Muskingum-Cunge. Pois, segundo Lima Neto (2019), este método supera as limitações apresentadas pelo método clássico Muskingum, uma vez que este requer parâmetros mais difíceis de ser estimados, além de possuir hipóteses que frequentemente diferem das condições dos canais naturais.

O Método de Muskingum-Cunge permite a aplicação da rotina em rios sem dados de chuva ou vazão, pois são baseados em dados hidráulicos, como a declividade, largura e comprimento do canal, em vez de utilizar o histórico de dados das vazões de cheia. Além disso, o método considera a atenuação de ondas de cheia através do canal, pois representa a translação da onda de cheia e redução da vazão de pico, uma vez que leva em consideração características do escoamento, tais como, a celeridade ou tempo de retardo, bem como o armazenamento na calha do rio.

Com objetivo de simular as condições hidrometeorológicas das sub-bacias da área de estudo foi adotado o método CN/SCS para determinação da precipitação efetiva e do hidrograma unitário a partir do SCS para obtenção dos dados chuva-vazão.

O parâmetro CN é um valor numérico que retrata a capacidade de infiltração da área em função do tipo de solo, do tipo de uso e ocupação do solo e das condições de umidade de uma área (USDA, 1986). Ele pode ser estimado através do cruzamento das informações do grupo hidrológico com o tipo de uso e ocupação do solo, tendo como valores de referência fornecidos pelo SCS. A Tabela 4 orienta como obter o CN para as condições locais. Sendo assim, os valores do parâmetro CN adotados no estudo

seguiram a orientação desta Tabela. Por fim, o CN adotado para a sub-bacia foi a média dos CNs obtidos para cada uma das 5 classes de ocupação e uso solo.

Tabela 4 - CN fornecido através do cruzamento dos dados de capacidade de infiltração da área por tipo de solo e o tipo de uso e ocupação do solo.

Utilização ou cobertura do solo	Superfície do Solo	Grupo Hidrológico			
		A	B	C	D
Espaço abertos, relados, parques, campo de golfe, cemitérios, em boas condições	Com relva em mais de 75% da área	39	61	74	80
	Com relva 50% a 75% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritório		89	92	94	95
Zonas industriais		81	88	91	93
Zonas residenciais					
	Lotes (m ²)	% média impermeável			
	<500	77	85	90	92
	1000	61	75	83	87
	1300	57	72	81	86
	2000	54	70	80	85
	4000	51	68	79	84
Parques de estacionamentos, telhados, viadutos		98	98	98	98
Arruamentos e estradas					
Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais		98	98	98	98
Paralelepípedos		76	85	89	91
Terra		72	82	87	89

Fonte: Adaptado de Tucci et al., 1993.

A fim de determinar o escoamento no canal em função da sua rugosidade foi adotado o coeficiente de Manning de 0,026, mais adequado para as características do trecho do rio simulado, conforme calculado por Gonzalez (2014).

Finalizada toda a etapa de calibração do modelo, o modelo inicia o processo de cálculo da vazão propagada em função dos parâmetros citados e das vazões de entrada, do fluxo de base e do pico conforme a Equação 8.

$$Q_0 = Q_B + \frac{1}{2}(Q_{pico} - Q_B) \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

Q_0 : Vazão de entrada ($m\ s^{-1}$)

Q_B : Vazão de base ($m\ s^{-1}$)

Q_{pico} : Vazão de pico ($m\ s^{-1}$)

O processo de calibração descrito a cima foi aplicado individualmente para a modelagem da vazão na área de drenagem da estação Cel. Veiga, assim como na região Central de Petrópolis.

3.4.2. Validação do modelo HEC-HMS

Além do conhecimento das incertezas inerentes aos processos envolvidos na modelagem, a validação do modelo é comumente considerada como parte do processo de criação do mesmo. Assim, a modelagem deve ser desenvolvida para uma aplicação específica e sua validade deve ser determinada de acordo com essa finalidade (SARGENT, 2013).

O processo de validação exige uma avaliação numérica dos resultados para comparar os desempenhos obtidos. Existem vários índices que podem facilitar a comparação dos resultados simulados por um modelo aos dados observados. Neste estudo, foi adotada a exatidão como parâmetro de mérito de verificação da qualidade da validação, conforme expresso na Equação 9.

$$E = \frac{V_{estimado}}{V_{medido}} \times 100 \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

E = Exatidão (%);

$V_{estimado}$ = Valor estimado;

V_{medido} = Valor medido.

Para validação do modelo HEC-HMS na bacia hidrográfica do rio Quitandinha adotado neste estudo foi utilizada a maior vazão medida *in loco* no verão do ano 2019 (V_{medido}) e confrontada com a vazão estimada pelo modelo (V_{estimado}). A vazão medida *in loco* foi obtida na estação Centro, já a vazão estimada foi obtida na mesma área de drenagem.

3.5. Simulação do modelo HEC-RAS

O presente trabalho utilizará o modelo hidrodinâmico HEC-RAS 5.0.3, com abordagem bidimensional (2D). O software é livre, desenvolvido pelo *US Army Corps of Engineers* (US ACE, 2019). Este software foi selecionado neste estudo pois permite realizar análises para os regimes permanentes e não permanentes. Além disso, permite representar pontes e galerias, rios com combinação de regimes, analisar sedimentos, estudar o rompimento de barragens e a qualidade das águas.

Os resultados do HEC-HMS foram usados como dados de entrada no modelo hidráulico HEC-RAS.

3.5.1. Calibração do modelo HEC-RAS

Para a simulação da mancha de cheia da Rua Coronel Veiga e Centro de Petrópolis foram utilizadas as vazões geradas pelo modelo HEC-HMS, o MDT, bem como o mapa de uso e ocupação do solo associado ao coeficiente de Manning.

Para a calibração do coeficiente Manning, a área de estudo foi dividida nas 5 classes de tipos de ocupação e uso do solo: Área Urbanizada, solo exposto, vegetação, afloramento rochoso e rio. Para cada área foi atribuído um valor de Manning, segundo Chow (1994), de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 - Uso do solo e os respectivos coeficientes de Manning

Uso do solo	Valor de Manning
Área Urbanizada	0,1
Rocha Exposta	0,015
Solo Exposto	0,023
Rio	0,07
Vegetação	1,5

Fonte: Adaptado CHOW, 1994.

O coeficiente de Manning (n) representa a resistência ao escoamento no percurso hidráulico, também conhecido como rugosidade (CHOW, 1994). Este é um parâmetro que combina características da forma e do recobrimento do canal, quer seja natural ou não, assim como do nível de meandrização e da densidade e tamanho da cobertura vegetal (ANDRADE, 2017).

Finalizado o processo de calibração do modelo, foram gerados os mapas de inundação das seguintes áreas: Na rua Coronel Veiga, próximo à estação Cel. Veiga e na região central de Petrópolis, próximo à estação Centro para o evento de maior transbordamento registrado em 2019.

3.5.2. Validação do modelo HEC-RAS

Para validação do modelo HEC-HMS na bacia hidrográfica do rio Quitandinha adotado neste estudo foi utilizada a maior cota medida pela estação Cel. Veiga em 2019 (V_{medido}) e confrontada pela profundidade estimada pelo modelo no mesmo ponto de medição (V_{estimado}). A Equação 8 foi também utilizada para verificar a qualidade da validação.

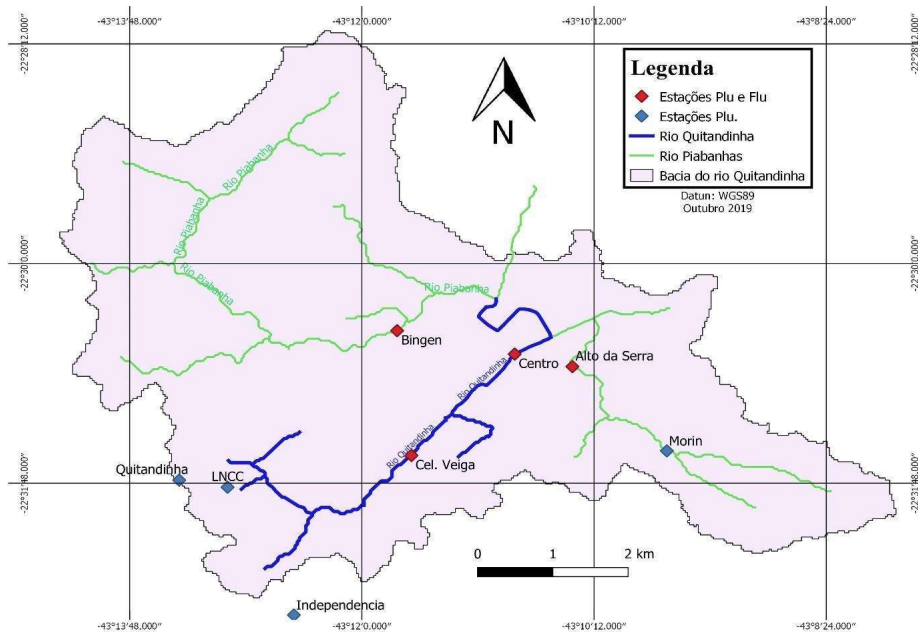
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise fluviométrica e pluviométrica da bacia hidrográfica do rio Quitandinha

4.1.1. Avaliação dos regimes de chuvas da bacia hidrográfica do rio Quitandinha

Para avaliação do regime de chuvas da bacia do rio Quitandinha foram analisados os dados de volume precipitado de oito estações pluviométricas operadas pelo Instituto Estadual do Ambiente do Rio de Janeiro (INEA), localizadas na região da bacia, conforme mostra a Figura 13. Pode se observar que das oito estações, duas encontram-se situadas no rio Quitandinha, que são Cel. Veiga e Centro, as quais também registram dados fluviométricos.

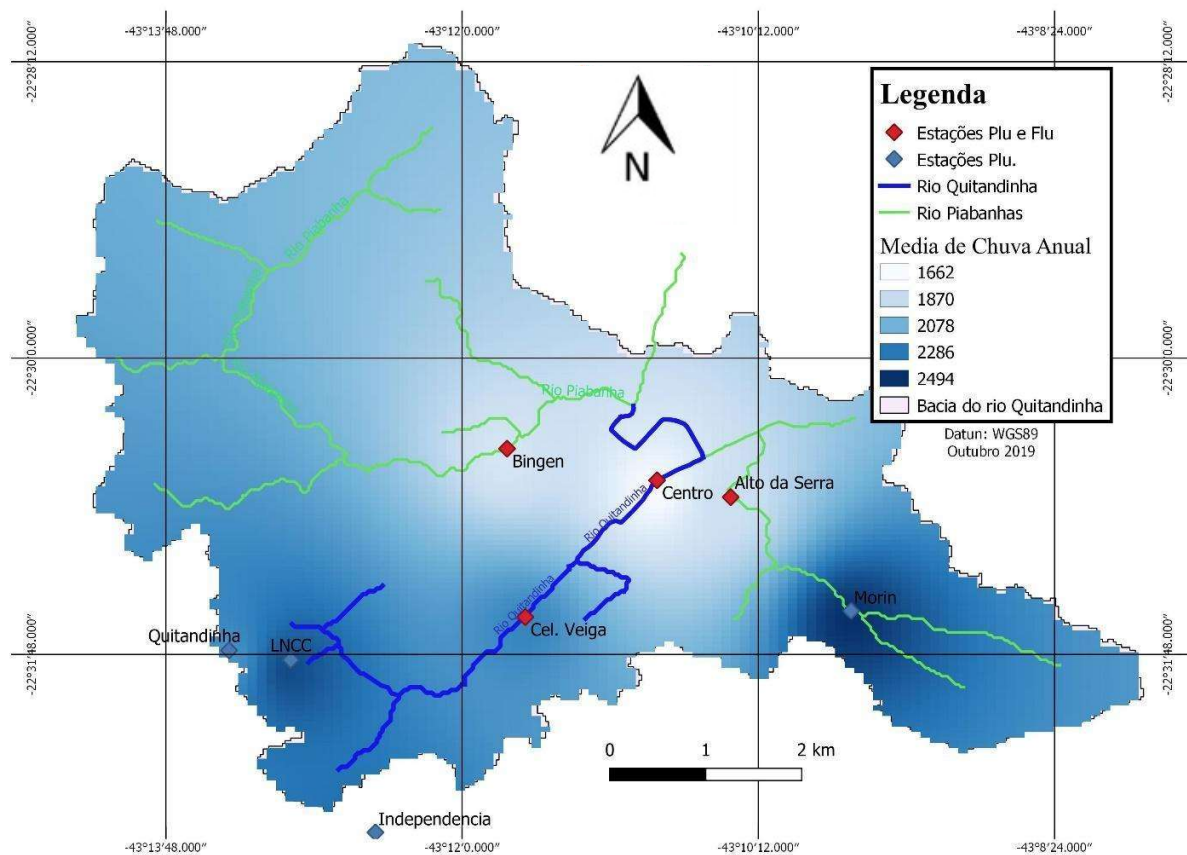
Figura 13 - Mapa da bacia do rio Quitandinha com a localização das estações pluviométrica e fluviométricas operadas pelo INEA.



Fonte: O autor, 2021.

A Figura 14 apresenta o mapa de distribuição dos volumes de chuva acumulados na bacia do Quitandinha, tomando como base a precipitação média acumulada anual do período de 2012 a 2018 das oito estações pluviométricas operadas pelo INEA.

Figura 14 - Mapa de distribuição das chuvas na bacia do rio Quitandinha, com a localização das estações pluviométrica e fluviométricas operadas pelo INEA



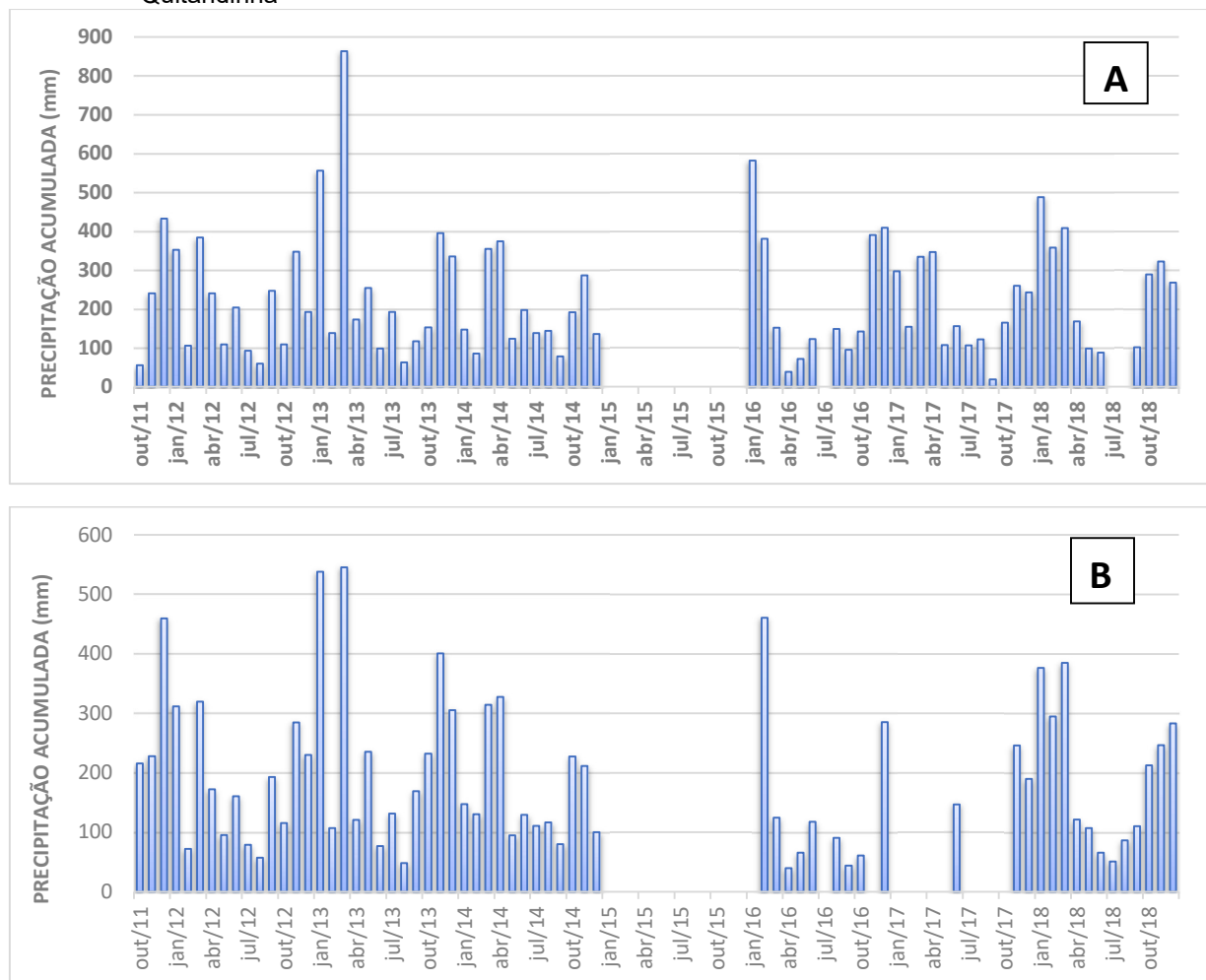
Fonte: O autor, 2021.

No mapa de distribuição das chuvas da bacia do rio Quitandinha (Figura 14), adotou a escala de azul para expressar os volumes de chuva precipitados, onde os tons mais claros representam os locais que tiveram a menor média anual e os tons mais escuros expressam as áreas com maior volume acumulado. Portanto, a Figura 14 mostra que as estações mais a montante da bacia apresentaram as maiores médias de chuvas acumuladas anuais, ou seja, chove mais na cabeceira da bacia em relação a

sua foz. A estação Morin apresentou a maior média de chuva anual com 2493 mm por ano e a estação Centro registrou a menor média de chuva anual, com 1660 mm por ano.

Para uma avaliação mais específica do comportamento das chuvas em Petrópolis, foram gerados histogramas com os dados de precipitação pluviométrica acumulada mensal das estações Cel. Veiga e Centro (Figura 15) para o período de outubro de 2011 a dezembro de 2018.

Figura 15 - Histograma de precipitação acumulada mensal do período de 2011 a 2018 na bacia do rio Quitandinha



Legenda: (A) estação Cel. Veiga (B) estação Centro.

Fonte: O autor, 2021.

A Figura 15 evidencia a presença da sazonalidade do regime de chuvas da região serrana, onde registram as maiores quantidades de chuvas nos meses de outubro a março, que compreende a primavera e o verão, que é o período chuvoso do sudeste. Além disso, é possível observar que dentre o período estudado, o ano mais chuvoso foi o ano de 2013, onde o mês de março obteve o maior índice pluviométrico acumulado em ambas às estações, com a estação Cel. Veiga registrando mais de 800 mm de chuva acumulada no referido mês e a estação Centro registrando mais de 500 mm.

As Tabelas 6 e 7 apresentam as médias mensais de chuva precipitada acumulada por mês, tomando como base os dados dos anos de 2011 a 2018. Assim como, as médias dos volumes máximos de chuva precipitados acumulados em 24 h e 1h de cada mês da estação Cel. Veiga e Centro, respectivamente.

Tabela 6 - Dados pluviométricos da estação Cel. Veiga no período de 2011 a 2018.

Mês	Média das precipitações acumuladas (mm)	Média das máximas precipitações em 24 horas (mm)	Média das máximas precipitações em 1 hora (mm)
Janeiro	403,66	104,99	38,62
Fevereiro	203,57	61,17	31,22
Março	416,11	146,58	53,59
Abril	223,28	75,75	27,75
Mai	126,97	57,83	12,19
Junho	144,29	63,79	21,96
Julho	118,75	50,68	13,07
Agosto	94,93	46,83	12,64
Setembro	109,26	54,89	10,70
Outubro	157,59	71,39	26,34
Novembro	320,20	84,90	30,06
Dezembro	287,89	97,24	34,48

Fonte: O autor, 2021.

Tabela 7 - Dados pluviométricos da estação Centro no período de 2011 a 2018.

Mês	Média das precipitações acumuladas (mm)	Média das máximas precipitações em 24 horas (mm)	Média das máximas precipitações em 1 hora (mm)
Janeiro	278,65	84,35	33,20
Fevereiro	212,90	65,10	32,25
Março	337,90	98,60	46,05
Abril	156,25	51,75	19,35
Mai	119,65	48,80	14,85
Junho	116,21	65,00	19,67
Julho	93,00	36,69	15,19
Agosto	79,90	36,55	10,45
Setembro	119,15	55,85	12,30

Outubro	177,38	75,38	31,88
Novembro	269,45	91,33	31,36
Dezembro	264,71	66,00	33,43

Fonte: O autor, 2021.

Os dados pluviométricos das estações Cel Veiga e Centro mostraram que março foi o mês que registrou as maiores precipitações no ano, com a estação Cel. Veiga possuindo uma média de precipitação acumulada de 416,11 mm e a estação Centro com uma média de 337,90 mm. Além da precipitação média mensal, o mês de março também registrou as maiores médias de chuvas em 24 horas e em uma hora em ambas as estações.

Esses dados mostram que em março as autoridades públicas devem intensificar as ações de prevenção e mitigação de desastres e manter os níveis de atenção elevada, a fim de evitar maiores problemas, como os que ocorreram no dia 18 de março de 2013, onde segundo reportagem do G1(2018) morreram mais de 10 pessoas em decorrência das fortes chuvas na região.

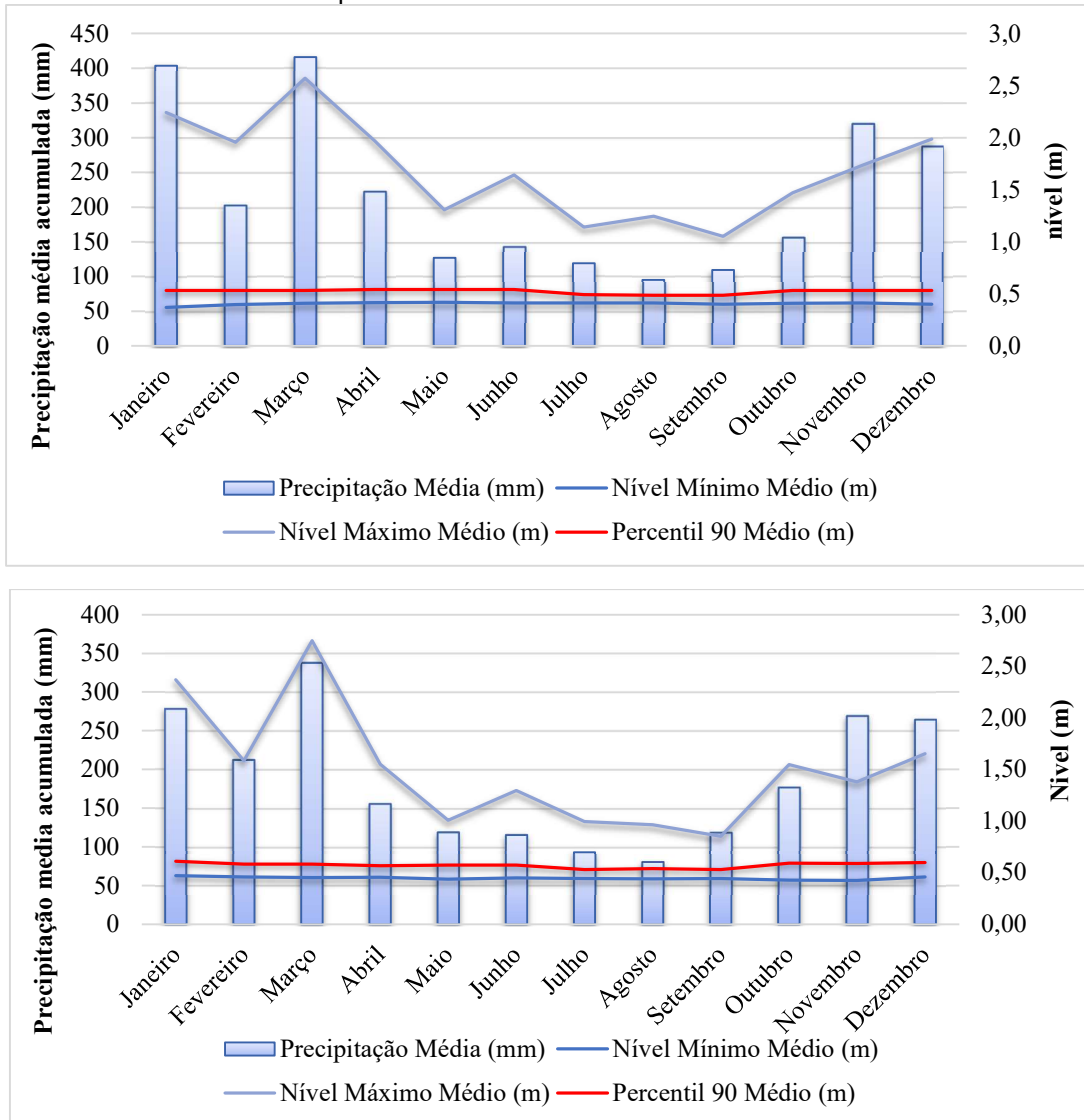
Segundo Guerra et al. (2007) o relevo atua como fator importante no aumento da turbulência do ar (ascendência orográfica), principalmente nas passagens de frentes frias, o que proporciona índices pluviométricos bem mais altos que os encontrados por outros municípios da região metropolitana do Estado do Rio de Janeiro.

A grande quantidade de chuva que precipita na cabeceira da bacia impacta significativamente na região central de Petrópolis, pois o escoamento superficial dessas águas reflete nas inundações que são observadas nas estações Cel. Veiga e Centro, conforme será apresentado na avaliação fluviométrica do rio Quitandinha.

4.1.2. Avaliação fluviométrica do rio Quitandinha

Para avaliação fluviométrica do rio Quitandinha foram analisados os dados de nível da estação Cel. Veiga e Centro. A Figura 16 apresenta os níveis médios que as estações Cel. Veiga e Centro registram ao longo do tempo de estudo.

Figura 16 - Precipitação média mensal acumulada versus níveis normal (percentil 90), mínimo e máximo do rio Quitandinha dos anos de 2011 a 2018, com a cota de transbordamento do rio ressaltado com a linha preta.



Fonte: O autor, 2021.

As maiores cheias e a maior frequência de inundações ocorreram nos meses do verão, principalmente em março, pois este é o mês com o maior índice de chuvas da região. Portanto, a Figura 16 ratifica o que era esperado, ou seja, as maiores enchentes do rio Quitandinha ocorreram no mês de março, registrando elevações do nível médio de até 2 m.

O nível do rio se manteve, de certa forma, constante ao longo dos meses do ano. No entanto, nos meses mais chuvosos, o nível se eleva rapidamente e pode atingir

patamares muito maiores em relação ao seu nível natural (percentil 90 médio). A resposta do rio a chuvas volumosas é rápida e normalmente pega a população de surpresa, com a elevação do nível d'água de forma abrupta e repentina. Logo, ter ferramentas que possam antever este episódio a fim de evitar catástrofes é o ideal.

De acordo com os registros coletados do Sistema de Alerta de Cheias do INEA que se iniciaram em 2016, foram observados 41 transbordamentos da calha do rio Quitandinha, no ponto onde se encontra a estação Cel. Veiga e 10 na estação Centro, até o ano de 2018, como pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8 - Número de transbordamentos da calha do rio Quitandinha na estação Cel. Veiga e Centro no período de 2016 a 2018.

Mês	N Cel. Veiga	N Centro
Janeiro	8	3
Fevereiro	8	1
Março	8	4
Abril	6	1
Maio	0	0
Junho	0	0
Julho	0	0
Agosto	0	0
Setembro	0	0
Outubro	1	0
Novembro	4	0
Dezembro	6	1

Fonte: O autor, 2021.

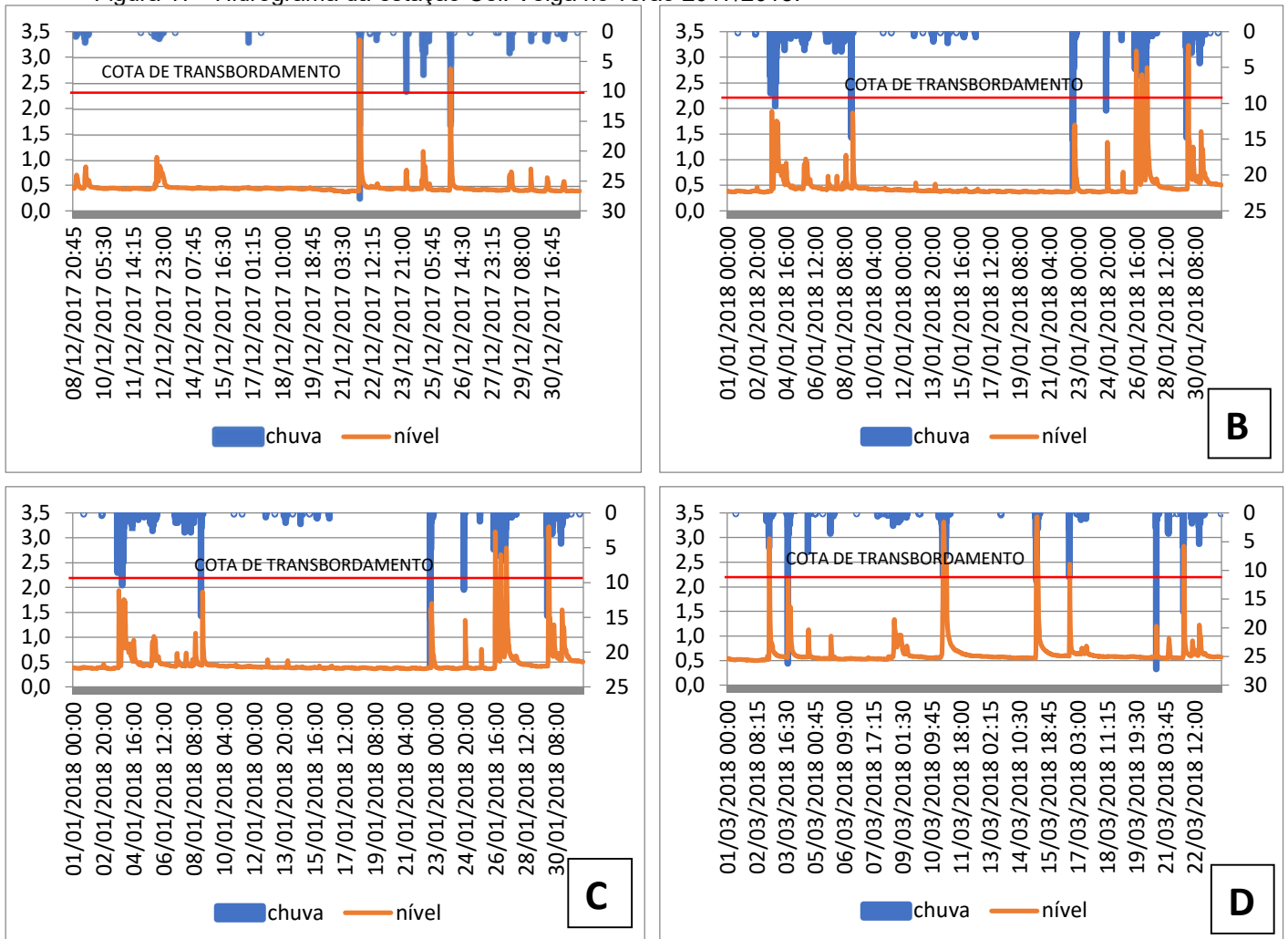
Esses transbordamentos estão concentrados nos meses chuvosos (outubro a março), com a maior frequência nos meses do verão, janeiro a março. Todos esses transbordamentos, na maioria das vezes, causam alagamentos nas vias à margem do rio Quitandinha e provocam grandes transtornos a cidade e sua população.

Segundo Vianna (2000), as inundações se caracterizam por observações de valores extremos de vazão e nível do rio, na qual são associadas a inundações de planícies ou áreas adjacentes ao canal principal dos cursos de água. Portanto, um hidrograma é a forma ideal de se verificar o comportamento do rio frente às chuvas da região.

Logo, foi elaborado o hidrógrama das estações Cel. Veiga (Figura 17) e Centro (Figura 22), para os meses de dezembro de 2017 a março de 2018, representando o período chuvoso, ou seja, o último verão analisado neste estudo, onde se verificam as maiores frequências de inundação e o comportamento da onda cheia. Cada estação foi avaliada separadamente nos itens 4.1.3 e 4.1.4.

4.1.3. Análise dos transbordamentos da estação Cel. Veiga

Figura 17 - Hidrograma da estação Cel. Veiga no verão 2017/2018.

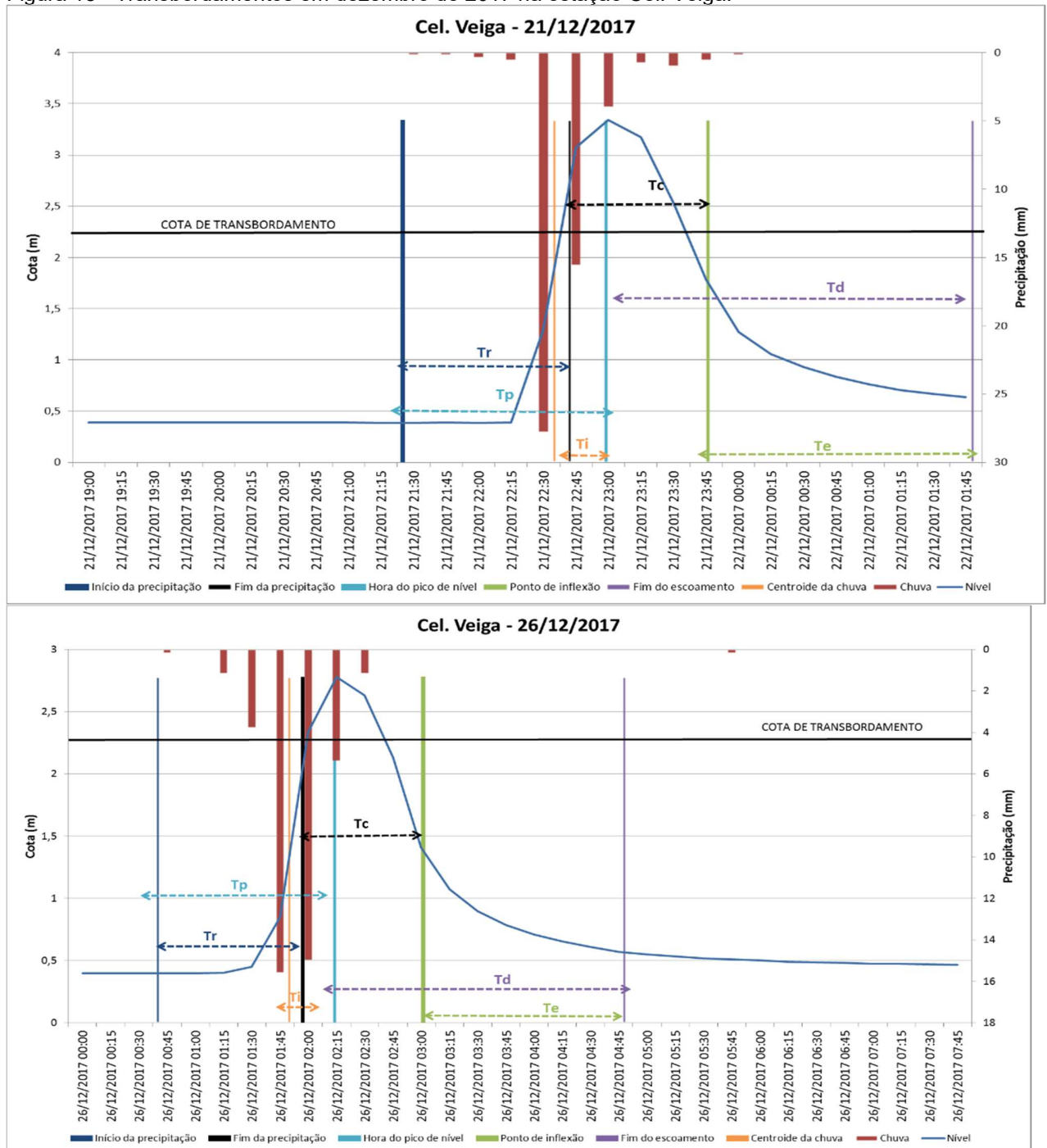


Legenda: (A) Dezembro 2017; (B) Janeiro 2018; (C) Fevereiro 2018; (D) Março 2018.
Fonte: O autor, 2021.

Foi observado que o mês de dezembro de 2017 apresentou 2 transbordamentos e os meses de janeiro, fevereiro e março de 2018 apresentaram 4, 4 e 6 transbordamentos, respectivamente (Figura 17). O mês de março novamente apresentou a maior frequência de transbordamentos e os maiores níveis atingidos, com destaque para o transbordamento do dia 15/03/2018, atingindo níveis com mais de 1 metro acima da cota de transbordamento. Segundo BARBOSA JR. (2015), no mês de março o solo já está bastante saturado, atingido sua capacidade máxima de infiltração, devido as maiores intensidades e duração das chuvas, que se iniciam em dezembro com o verão. Logo, o excesso de água acaba por escoar superficialmente na planície de inundação.

Para os dias que tiveram transbordamento foram realizadas uma análise mais detalhada individualizada do comportamento da curva de cheia da estação. Nas Figuras 18 a 21 são apresentados o Tempo de Precipitação (T_r), o Tempo de Crescimento (T_p), o Tempo de Resposta (T_i), o Tempo de Concentração (T_c), o Tempo de Esvaziamento (T_e) e o Tempo de Decrescimento (T_d) da estação Cel. Veiga nos meses de dezembro de 2017 a março de 2018.

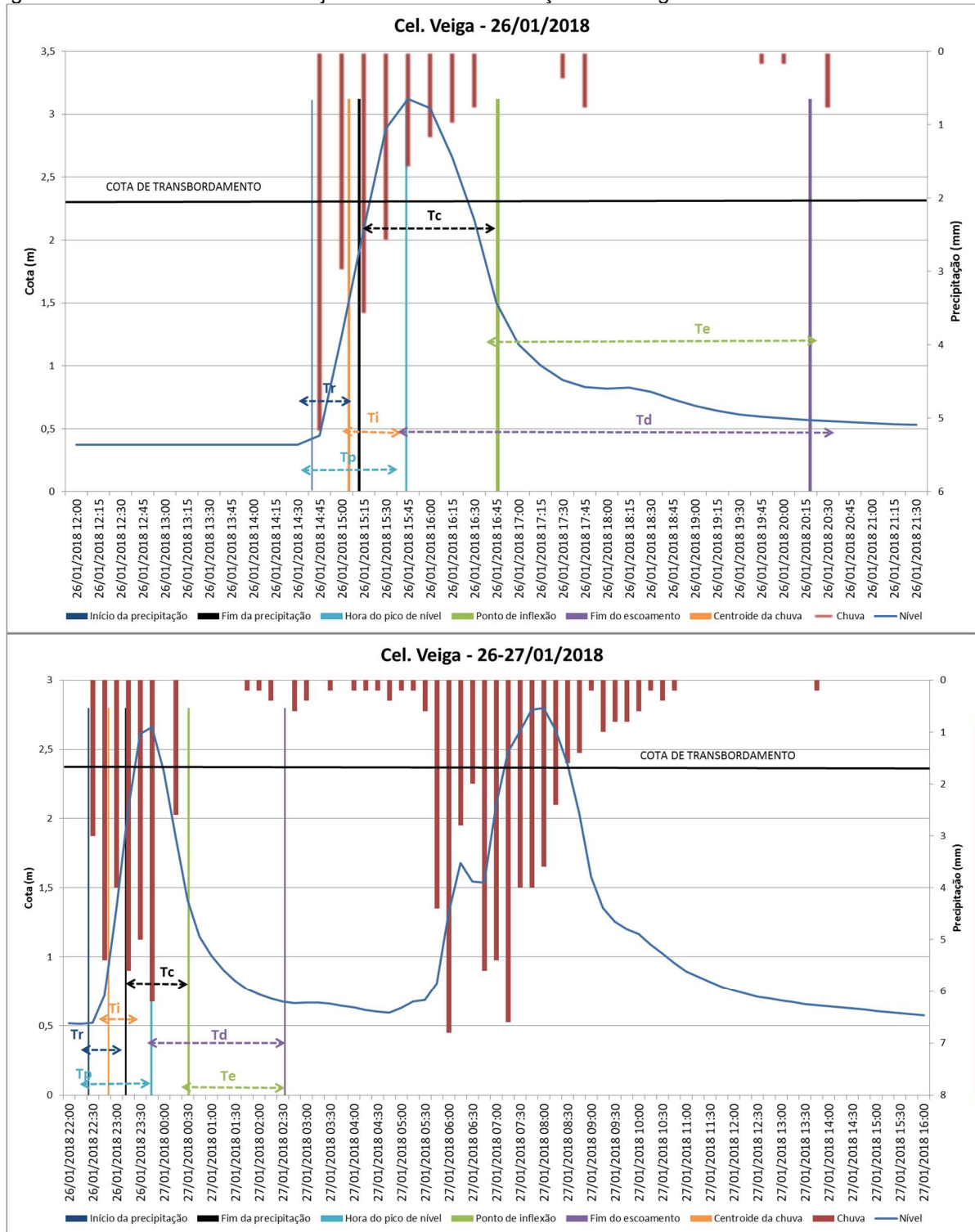
Figura 18 - Transbordamentos em dezembro de 2017 na estação Cel. Veiga.

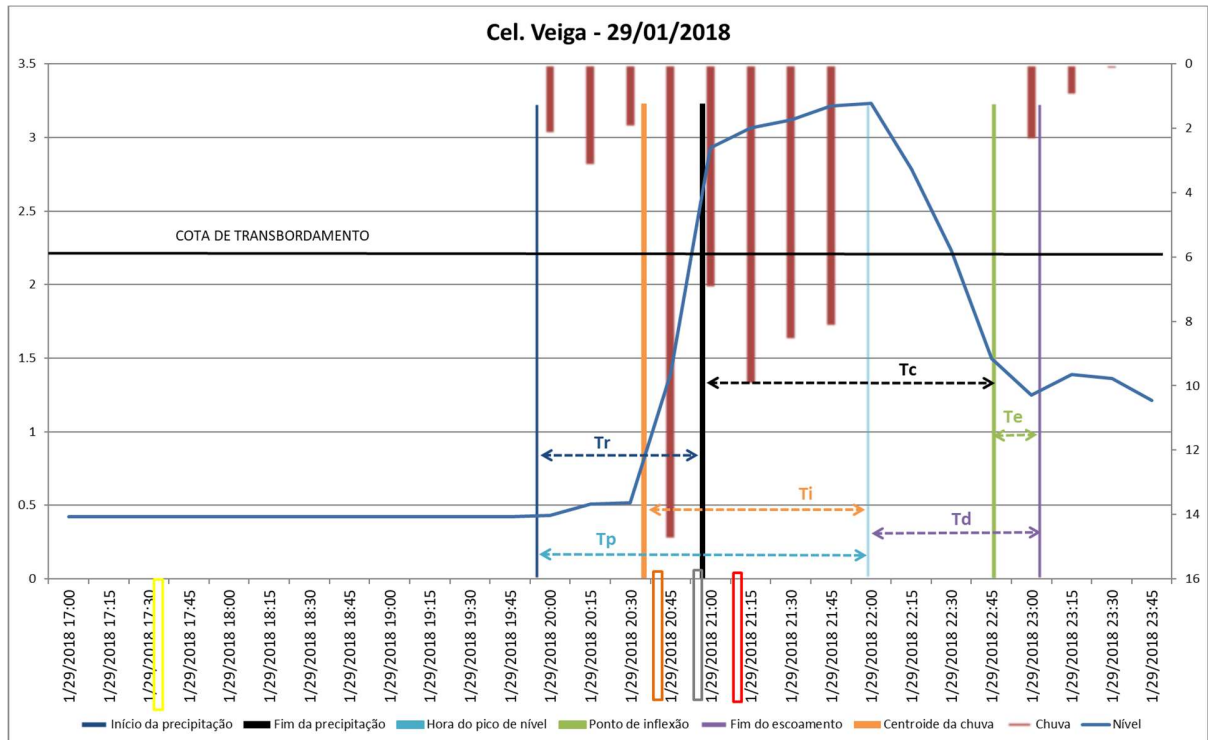


Com apenas dois transbordamentos no mês de dezembro (Figura 18), este foi o mês com o menor número de transbordamentos durante o período analisado. No

entanto, no dia 21/12/17 houve um transbordamento significativo, pois com uma chuva de 44 mm, registrada na estação, o rio se elevou a um nível de 3,34 metros e ultrapassou em aproximadamente 01 metro a cota de transbordamento. Neste mesmo dia é possível observar que a partir do momento que a estação registrou uma quantidade de chuva significativa, às 22h30min, e após 15 min o nível do rio já estava acima da cota de transbordamento.

Figura 19 - Transbordamentos em janeiro de 2018 na estação Cel. Veiga.





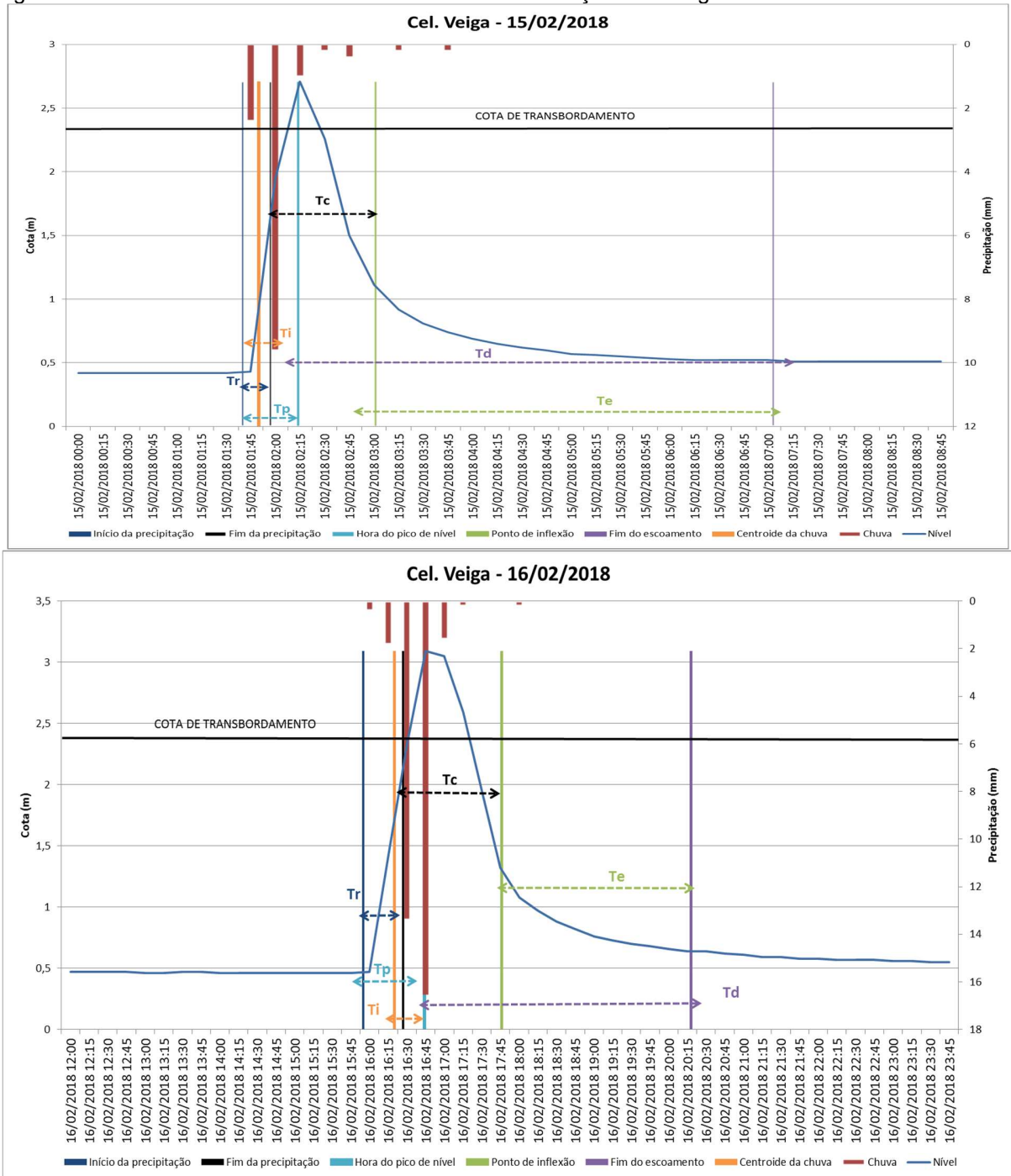
Legenda: (A) dia 26/01/18; (B) dia 26 e 27/01/18; (C) 29/01/18

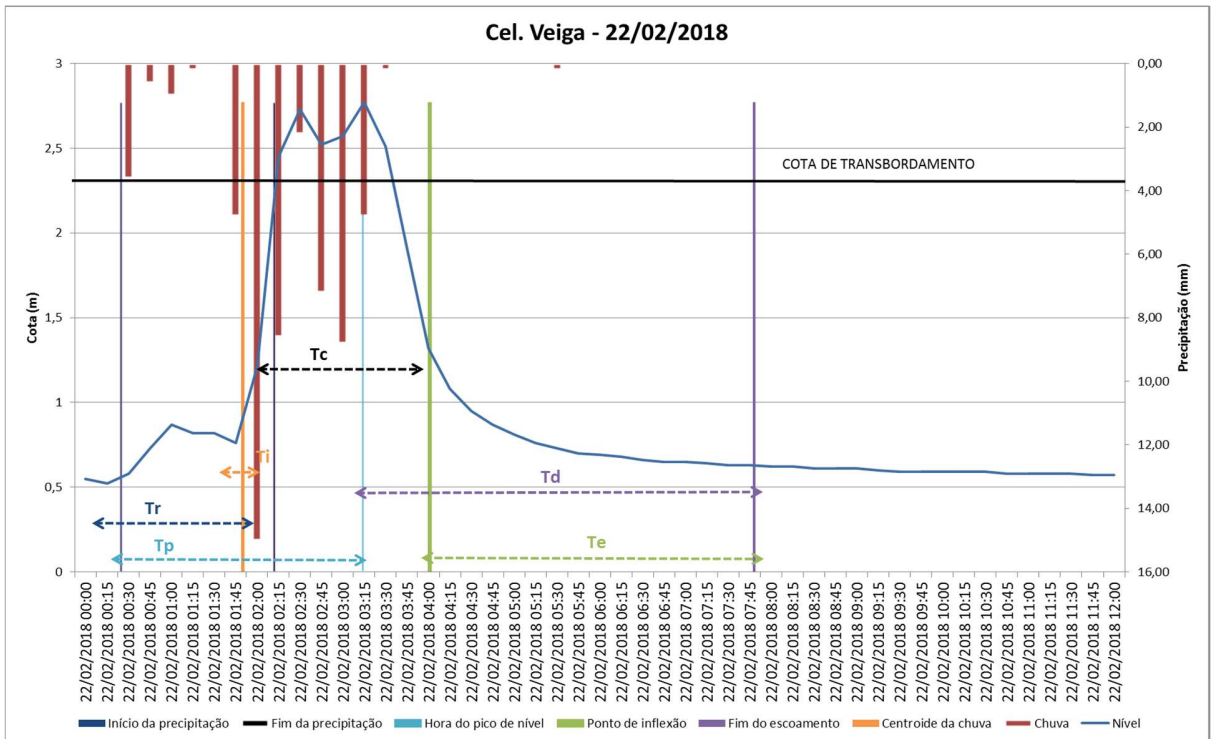
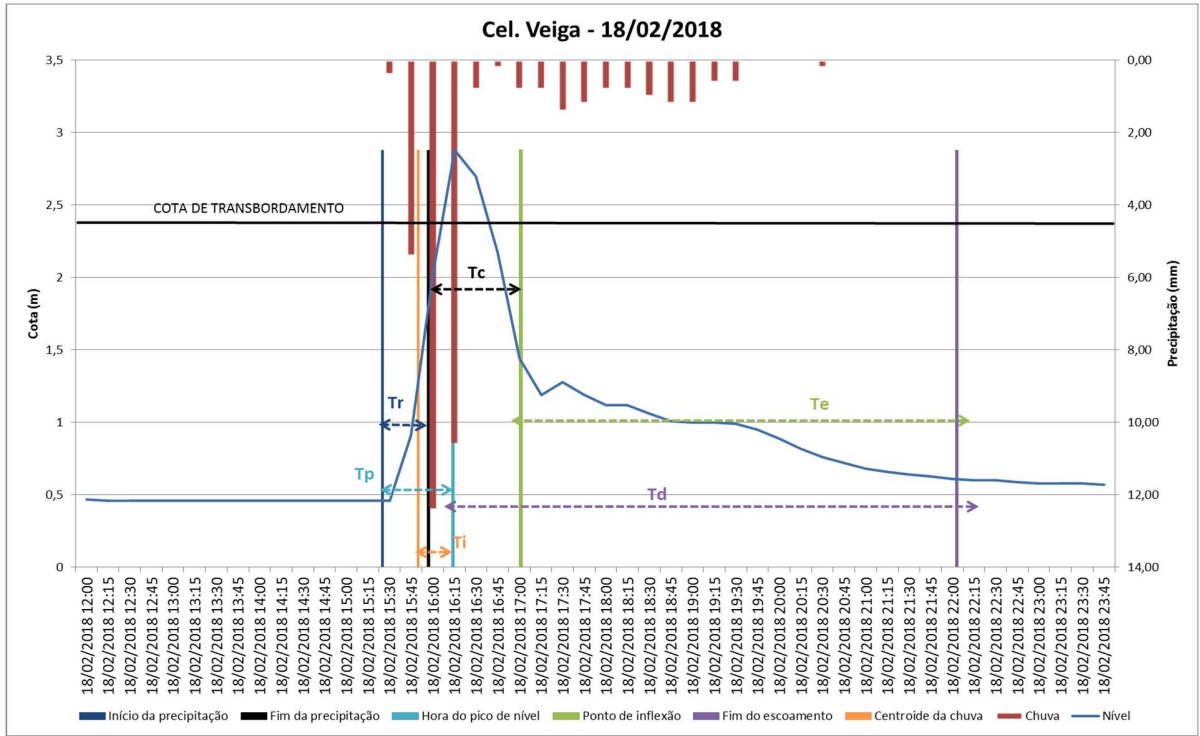
Fonte: O autor, 2021.

No mês de janeiro de 2018 (Figura 19) foram registrados 4 transbordamentos, com destaque para o dia 26/01/18, pois houveram registros de 2 transbordamentos da calha do rio em um único dia, um no início da tarde e outro no final do dia e um outro transbordamento logo no início do dia 27/01/18. Os dois transbordamentos do dia 26 apresentaram um tempo de resposta muito curto, ou seja, o tempo entre o início do registro de chuva até o nível do rio ultrapassar a cota de transbordamento ocorreu em torno de 30 minutos.

Em relação ao transbordamento do dia 29/01/18 é possível observar que o nível do rio se manteve em pelo menos 1h30min acima da cota de transbordamento, causando grandes problemas a cidade.

Figura 20 - Transbordamentos em fevereiro de 2018 na estação Cel. Veiga.





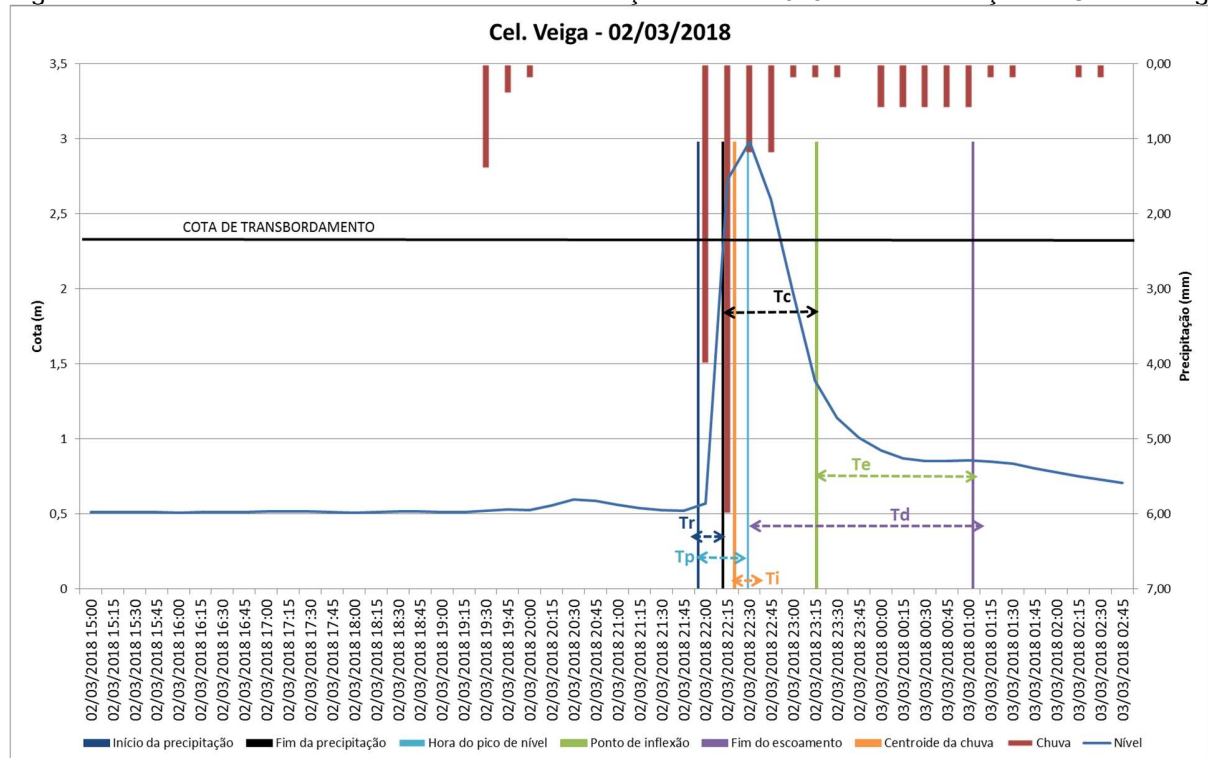
Legenda: (A) dia 15/02/18; (B) dia 16/02/18; (C) 18/02/18; (D) dia 22/02/18.

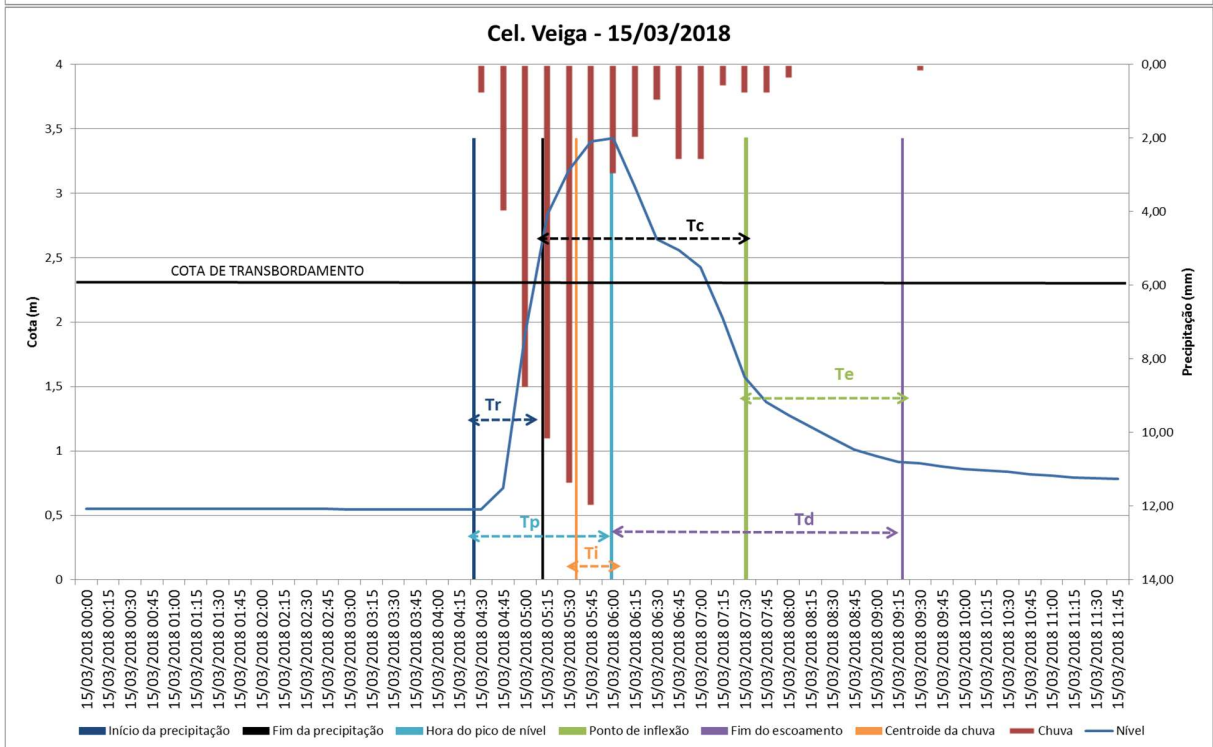
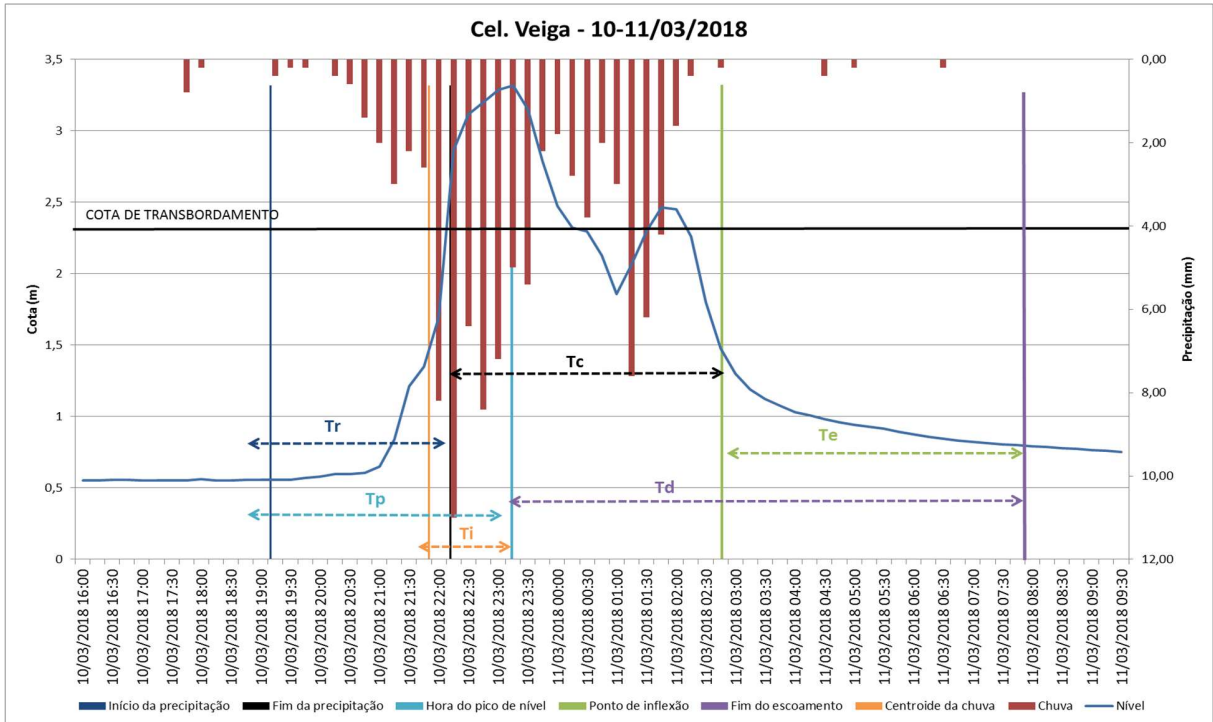
Fonte: O autor, 2021.

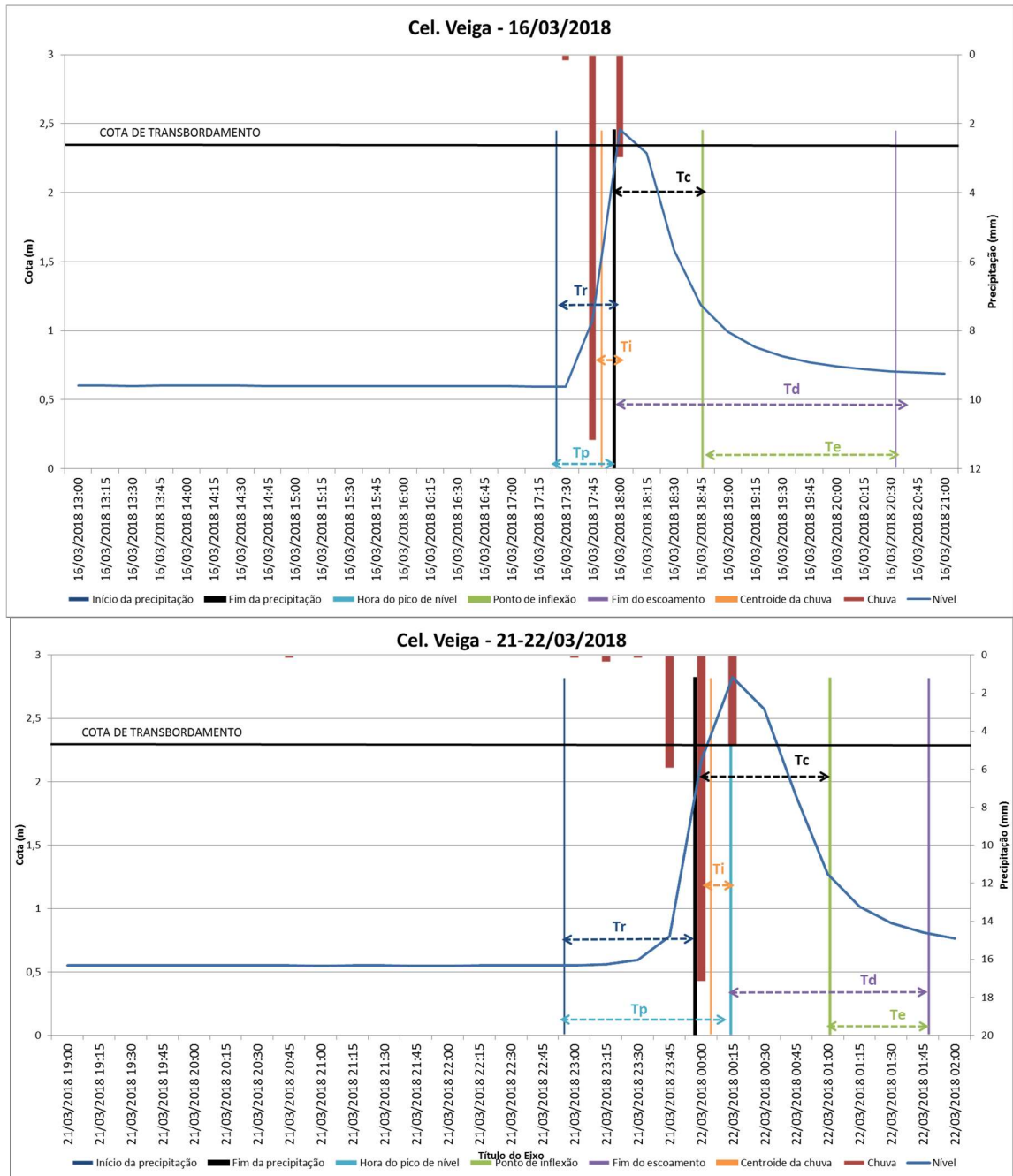
No mês de fevereiro de 2018 (Figura 20) foram registrados também 4 transbordamentos. Os transbordamentos de fevereiro apresentaram praticamente as mesmas características que os observados em janeiro, com uma elevação rápida a partir do início das chuvas, com uma curta duração (inferior a 30 min). A intensidade das chuvas nessa época do ano mostra como este rio está suscetível a cheias repentinas. Cabe destacar que os transbordamentos de fevereiro apresentaram duração relativamente baixa, porém não mesmos prejudiciais ao cotidiano da cidade.

O mês de março (Figura 21) apresentou a maior frequência de inundações, com seis elevações do nível do rio acima da cota de transbordamentos. No dia 15/03/18 a cota do rio chegou a 3,43 m, mais de 01 metro acima da calha do rio, e o tempo do início da chuva até o rio atingir essa elevação (tempo de crescimento), foi de apenas 1h:30min e o tempo em que o nível do rio se manteve acima foi de mais de 2 h.

Figura 21 - Transbordamentos em março de 2018 na estação Cel. Veiga.







A Tabela 9 apresenta os: Tempos de Precipitação (T_r), Tempo de Crescimento (T_p), Tempo de Resposta (T_i), Tempo de Concentração (T_c), Tempo de Esvaziamento (T_e) e o Tempo de Decrescimento (T_d) em cada transbordamento de dezembro de 2017 a março de 2018 da estação Cel. Veiga.

Tabela 9 - Tr, Tp, Ti, Tc, Te, Td (min) de cada evento com transbordamento na estação Cel. Veiga no verão 2017/2018

Eventos com Transbordamentos	Tempo de precipitação (Tr)	Tempo de Crescimento (Tp)	Tempo de Resposta (Ti)	Tempo de Concentração (Tc)	Tempo de Esvaziamento (Te)	Tempo de Decrescimento (Td)
21-22/03/2018	01:30	01:15	00:15	00:30	00:45	01:15
16/03/2018	00:30	00:30	00:15	00:45	01:45	02:30
15/03/2018	00:45	01:30	00:30	02:15	01:45	04:00
10-11/03/2018	03:00	04:00	01:30	04:30	04:45	09:15
02/03/2018	00:15	00:30	00:15	01:00	01:45	02:45
22/02/2018	01:45	02:45	01:30	01:45	03:45	05:30
18/02/2018	00:30	00:45	00:30	01:00	05:00	06:00
16/02/2018	00:30	00:45	00:30	01:15	02:30	03:45
15/02/2018	00:15	00:30	00:30	01:00	04:00	05:00
29/01/2018	01:00	02:00	01:30	01:45	00:15	01:00
26-27/01/2018 Caso 2	03:15	04:00	01:30	01:45	04:30	05:30
26-27/01/2018 Caso 1	00:45	01:15	01:00	01:15	02:00	02:45
26/01/2018	00:30	01:00	00:45	01:30	03:30	04:30
26/12/2017	01:15	01:30	00:30	01:00	01:45	02:30
21/12/2017	01:15	01:30	00:30	01:00	02:00	02:45
Tempo Médio	01:08	01:35	00:46	01:29	02:40	03:56

Legenda: Tempos de: Precipitação (Tr), Crescimento (Tp), Resposta (Ti), Concentração (Tc), Esvaziamento (Te) e Decrescimento (Td)

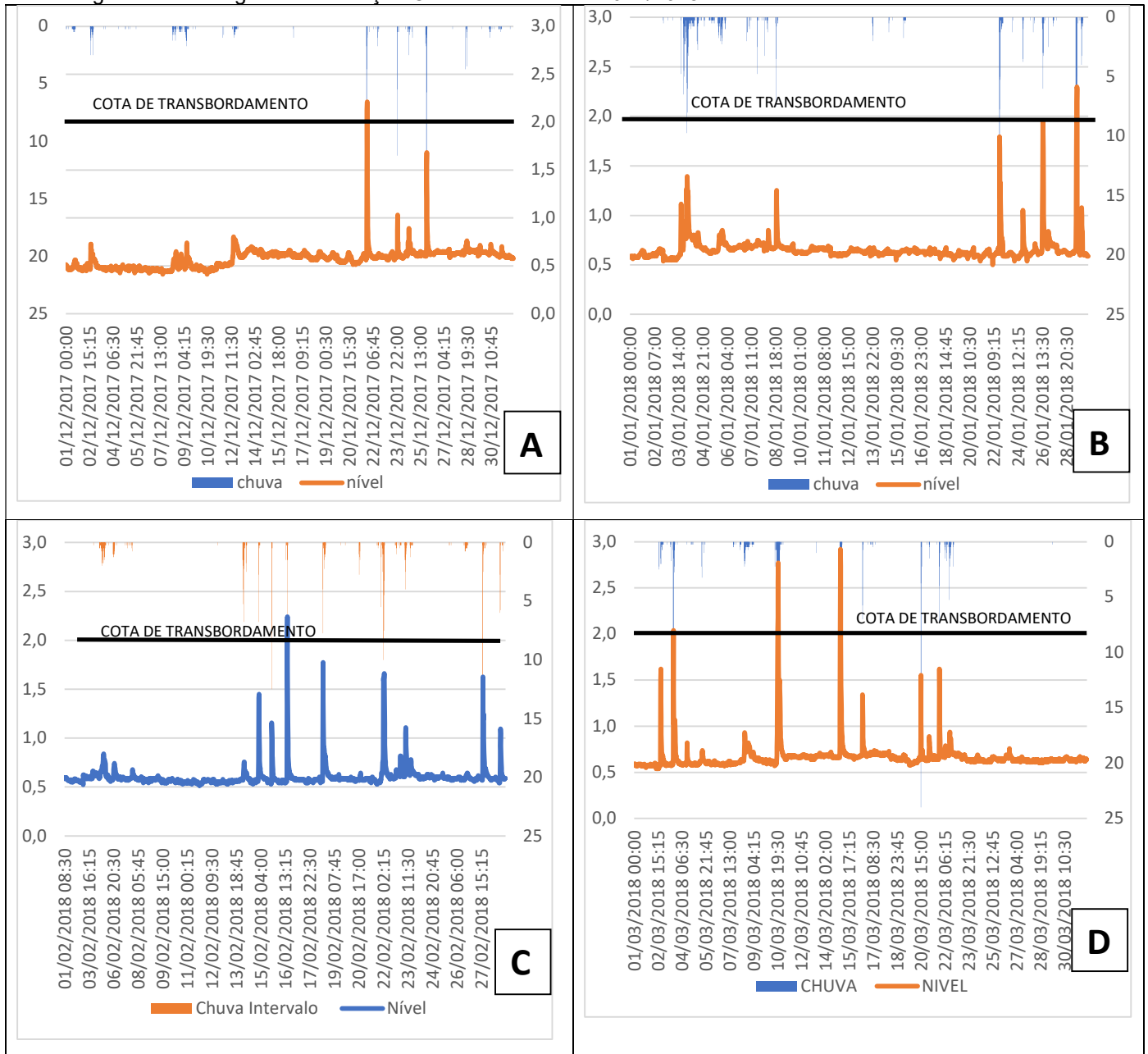
Fonte: Própria.

Na Tabela 9 é possível destacar que o tempo médio de precipitação necessário para os transbordamentos registrados na estação foi de aproximadamente 1 h e o tempo de resposta de menos de 50 min. Sendo assim, o tempo necessário para que o Sistema de Alerta de Cheias, operado pelo INEA, informe as autoridades competentes da cidade de Petrópolis, sobre um eventual transbordamento do rio Quitandinha se mostrou muito comprometido, assim como o tempo que as autoridades competentes possuem para tomar alguma ação de mitigação dos transtornos que uma inundação pode causar.

Por fim, o tempo médio de concentração, que corresponde aproximadamente o tempo que o nível do rio se manteve acima da cota de transbordamento, foi de quase 1h:30min, que corresponde um tempo significativo de alagamentos nas vias próxima ao rio Quitandinha.

4.1.4. Análise dos transbordamentos da estação Centro

Figura 22 - Hidrograma da estação Centro no verão de 2017/2018.



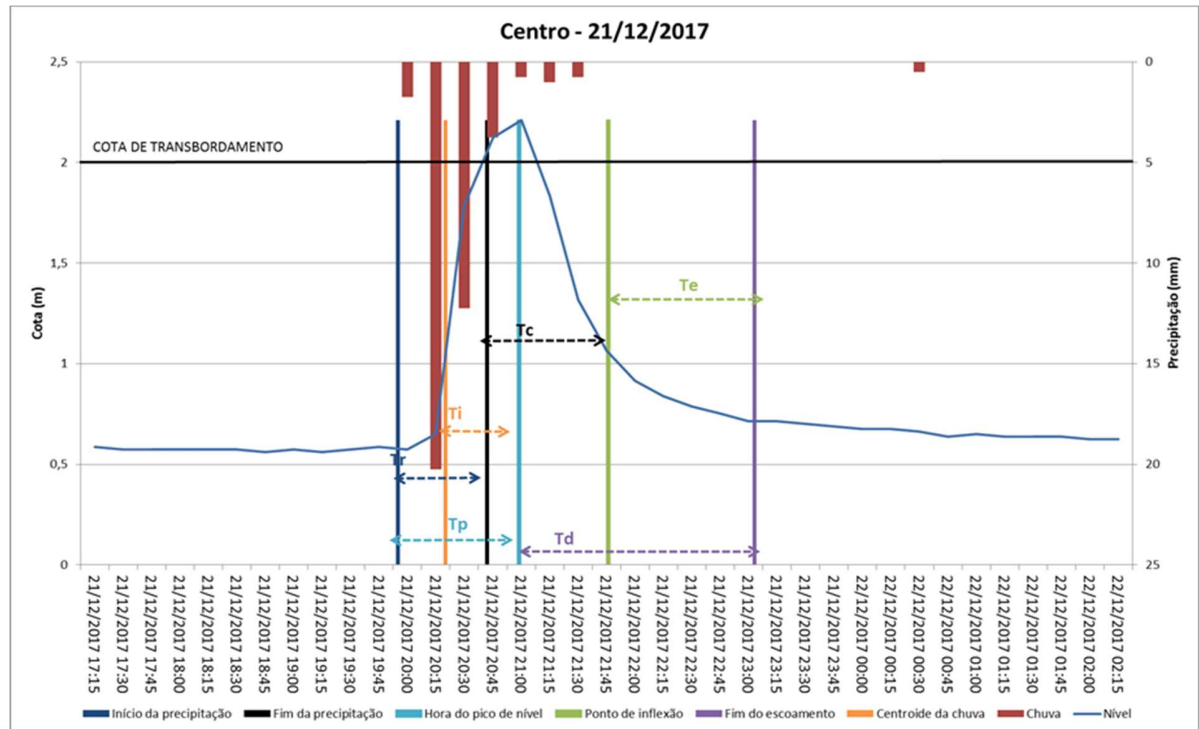
Legenda: (A) Dezembro 2017; (B) Janeiro 2018; (C) Fevereiro 2018; (D) Março 2018
 Fonte: O autor, 2021.

O Hidrograma da Figura 22 apresenta as cotas que o rio Quitandinha atingiu, assim como a precipitação pluviométrica registrada na estação Centro, durante os meses de dezembro de 2017 a março de 2018, tal como foi realizado para a estação Cel. Veiga.

Foi observado que os meses de dezembro de 2017, janeiro e fevereiro de 2018 apresentaram apenas um transbordamento ao longo de cada mês, já o mês de março de 2018 apresentou 3 transbordamentos (Figura 22). Logo, o mês de março novamente apresentou a maior frequência de inundações e os maiores níveis atingido pelo rio, com destaque para o transbordamento do dia 15/03/2018, o qual o atingiu níveis de quase 1 metro acima da cota de transbordamento.

Para os dias que tiveram transbordamento foram realizadas uma análise mais detalhada individualizada do comportamento da curva de cheia da estação. Nas Figuras 23 a 25 são apresentados o Tempo de Precipitação (T_r), o Tempo de Crescimento (T_p), o Tempo de Resposta (T_i), o Tempo de Concentração (T_c), o Tempo de Esvaziamento (T_e) e o Tempo de Decrescimento (T_d) da estação Centro nos meses de dezembro de 2017 a março de 2018.

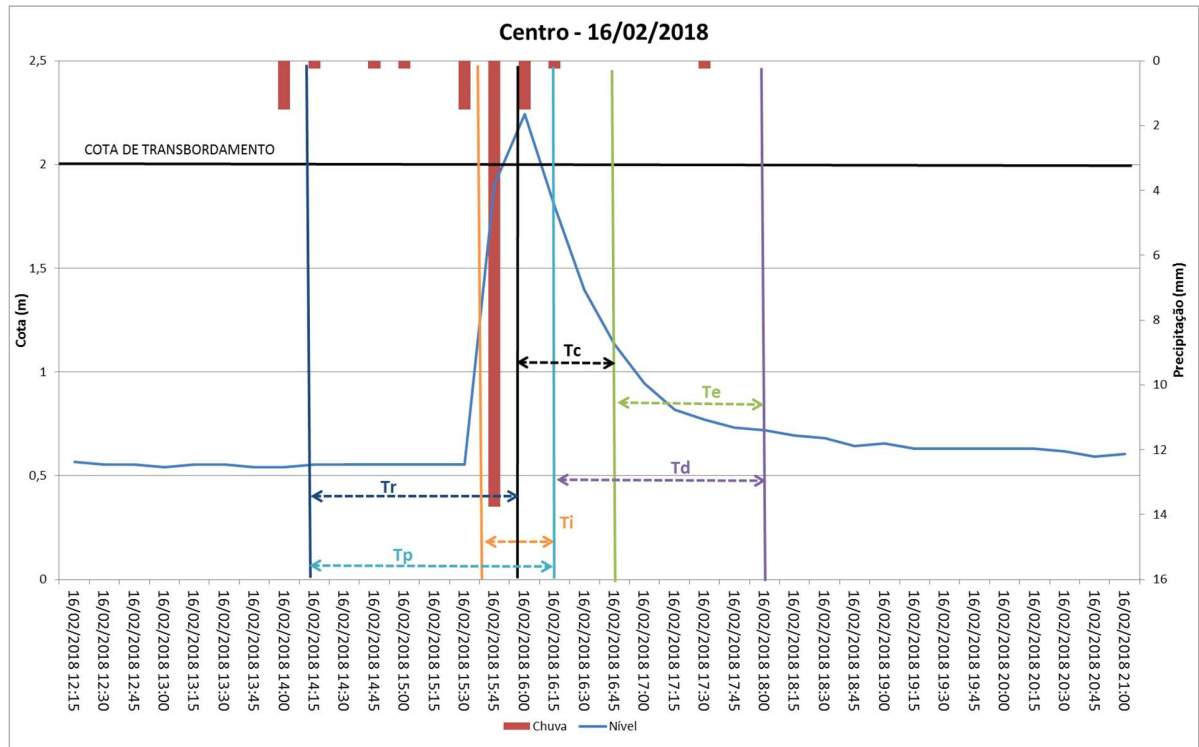
Figura 23 - Transbordamento em dezembro de 2017 na estação Centro.



Fonte: O autor, 2021.

O mês de dezembro de 2017 (Figura 23) apresentou apenas um transbordamento, com o nível d'água atingindo a cota de 2,21 m na régua da estação. Mas uma vez, destaca-se o um tempo de reposta menor que 30 min entre o início das chuvas e o início da inundação.

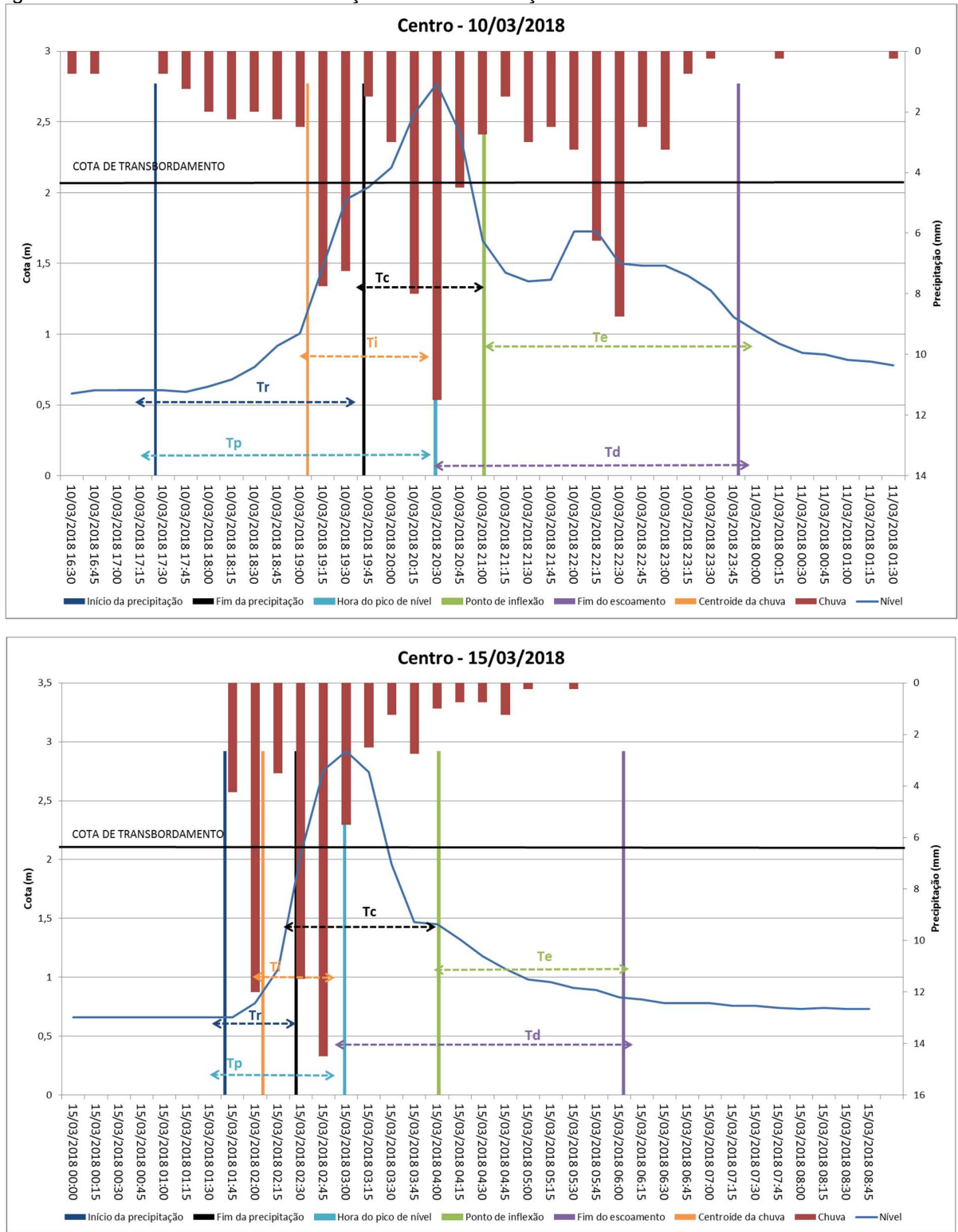
Figura 24 - Transbordamento em fevereiro de 2017 na estação Centro.



Fonte: O autor, 2021.

Em fevereiro (Figura 24) também só teve um transbordamento, no dia 16/02/18. A partir das chuvas mais intensas, com aproximadamente 14 mm em 15 min registrado na estação, o nível do rio se elevou rapidamente, com o nível d'água chegando a 2,23 metros na régua.

Figura 25 - Transbordamentos em março de 2018 na estação Centro.



Legenda: (A) dia 10/03/18; (B) dia 15/03/18

Fonte: O autor, 2021.

O mês de março (Figura 25) apresentou os maiores níveis de transbordamento no período estudado, com os dois eventos ultrapassando 2,50 m na régua da estação. No primeiro caso o transbordamento ocorreu após 2 h 30 min de chuva, já no segundo caso, o extravasamento da calha do rio ocorreu com apenas 45 min de chuva.

A Tabela 10 apresenta os: Tempos de Precipitação (Tr), Tempo de Crescimento (Tp), Tempo de Resposta (Ti), Tempo de Concentração (Tc), Tempo de Esvaziamento (Te) e o Tempo de Decrescimento (Td) em cada transbordamento do período estudado na estação centro.

Tabela 10 - Tr, Tp, Ti, Tc, Te, Td (min) de cada evento com transbordamento na estação Centro verão 2017/2018.

Eventos com Transbordamentos	Tempo de precipitação (Tr)	Tempo de Crescimento (Tp)	Tempo de Resposta (Ti)	Tempo de Concentração (Tc)	Tempo de Esvaziamento (Te)	Tempo de Decrescimento (Td)
15/03/2018	00:45	01:15	01:00	01:30	02:00	03:30
10/03/2018	02:15	03:00	01:30	01:15	02:45	04:00
16/02/2018	01:45	02:00	00:30	00:45	01:15	02:00
21/12/2017	00:45	01:00	00:45	01:00	01:15	02:15
Tempo Médio	01:22	01:48	00:56	01:07	01:48	02:56

Legenda: Tempos de: Precipitação (Tr), Tempo de Crescimento (Tp), Tempo de Resposta (Ti), Tempo de Concentração (Tc), Tempo de Esvaziamento (Te) e o Tempo de Decrescimento (Td)

Fonte: O autor, 2021.

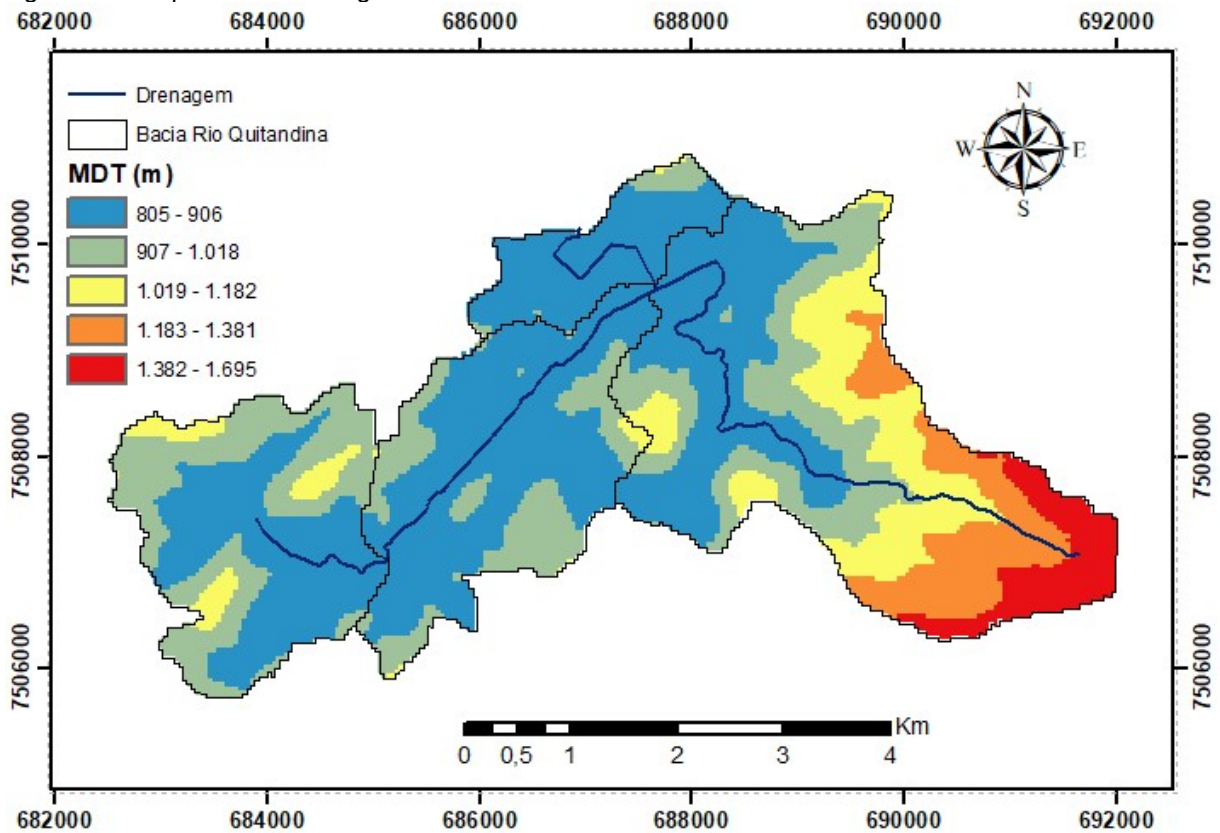
Na Tabela 10 é possível destacar que o tempo médio de precipitação necessário para os transbordamentos registrados na estação foi de aproximadamente 1 h, assim como o tempo de resposta e o tempo de crescimento. Portanto, novamente o Sistema de Alerta de Cheias, operado pelo INEA, tem um tempo curto para informar as autoridades competentes da cidade de Petrópolis, sobre um eventual transbordamento do rio Quitandinha. Portanto, o uso de modelagem para previsão das manchas de inundação de rios como esse se mostra uma ferramenta de extrema importância a fim de mitigar desastres e acidentes.

4.2. Características da bacia hidrográfica do rio Quitandinha

4.2.1. MDT

De acordo com a Figura 26, a bacia do rio Quitandinha tem uma altitude de que varia de 805 a 1.695 metros. Porém, o curso do rio quitandinha está entre 805 e 873 metros de altura. No entanto, vale ressaltar que má qualidade da resolução da curva de nível comprometeu na qualidade do MDT, ou seja, não está representando totalmente o terreno estudado, sendo essa uma limitação significativa do estudo. Logo, seria ideal a realização de um mapeamento altimétrico com uma resolução de pelo menos 5 x 5 metros, para se possa ter uma representação do relevo mais fidedigna da região.

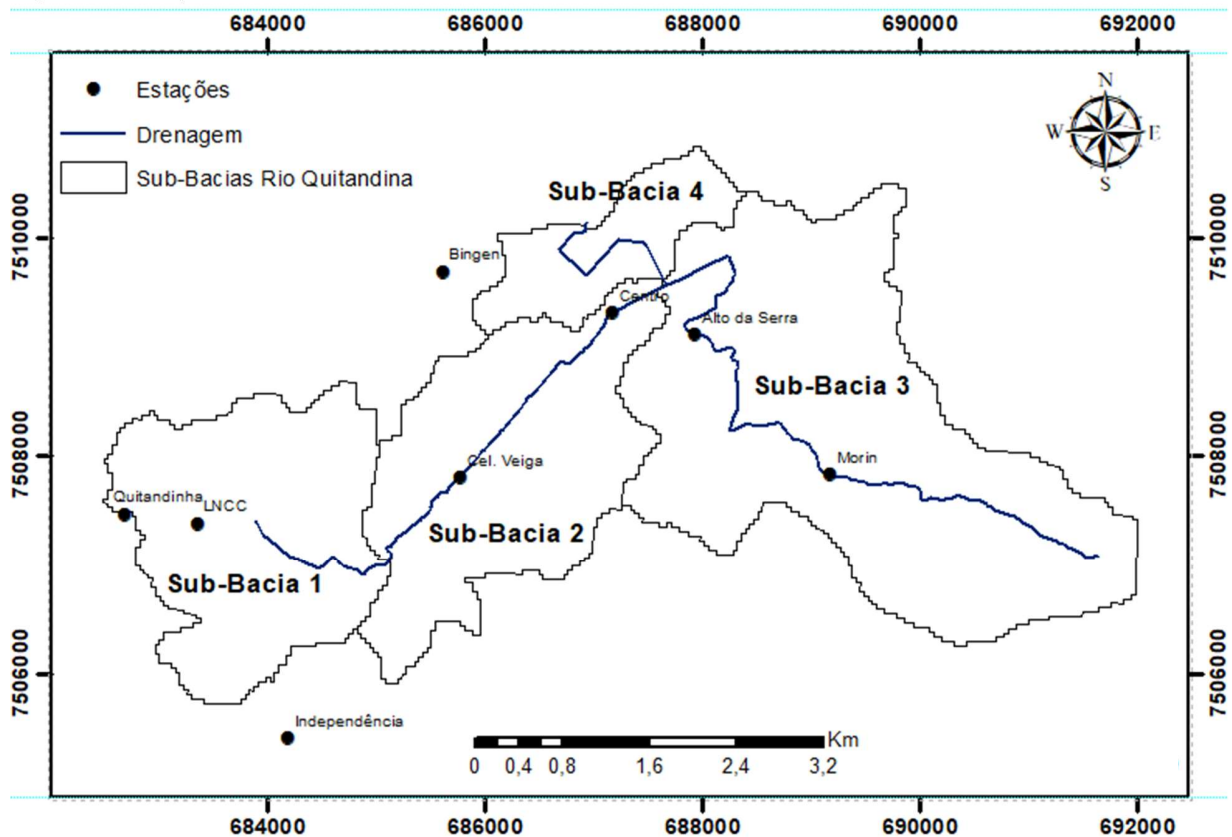
Figura 26 - Mapa do modelo digital do terreno da bacia do rio Quitandinha.



4.2.2. Bacia hidrográfica do rio Quitandinha e suas sub-bacias

Através da ferramenta do HEC-GeoHMS foi delimitada a bacia hidrográfica do rio Quitandinha e várias sub-bacias. Afim de simplificar a modelagem, foram agregadas algumas sub-bacias de forma a dividir a região em 4 sub-bacias (Figura 27).

Figura 27 - Mapa das sub-bacias do rio Quitandinha.



Nota: Datum: Sirgas 2000 / Dezembro, 2020

Fonte: O autor, 2021

A sub-bacia 1 corresponde ao trecho do rio Quitandinha com a declividade mais acentuada, já a sub-bacia 2 representa o trecho do rio Quitandinha que inicia no exultório da sub-bacia 1 até a interseção com o rio Palatinato que corre por toda a sub-bacia 3. Por fim após a referida interseção, o rio Quitandinha desagua na sub-bacia 4.

4.2.3. Dados físicos e pedológicos da bacia hidrográfica do rio Quitandinha

Com o auxílio das ferramentas do ArcGis foram obtidas de Área de drenagem, Extensão do trecho do rio (Km) e o DH contínuas na Tabela 11. A partir dos dados extraídos do ArcGis foi possível determinar o t_c e t_p de acordo com a equação 7.

Tabela 11 - Dados físicos das sub-bacias hidrográficas do rio Quitandinha

Sub-bacias	Área de Drenagem (km ²)	Extensão do trecho do rio (km)	DH	t_c	t_p
1	4,51	1,5	37	22,6726	13,6036
2	8,16	6,4	27	136,753	82,05195
3	10,55	6,45	440	47,1180	28,27081

Fonte: O autor, 2021

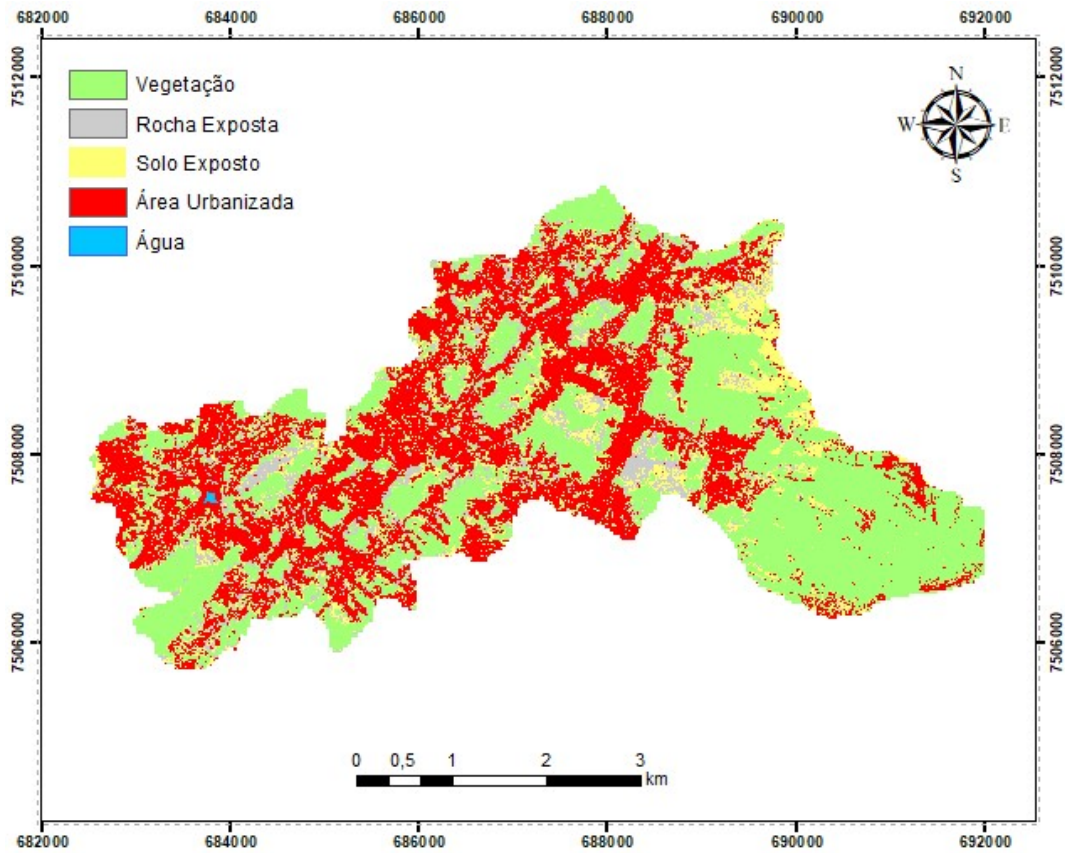
A sub-bacia 1 se destaca das demais, por ter um curto tempo de concentração (t_c), logo é uma área com pouca probabilidade de inundação, ratificando com o que atualmente é observado na região. Em contra partida, a sub-bacia dois que tem o maior t_c é a região que mais sofre com as inundações.

O solo da bacia do rio Quitandinha foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo de acordo com o mapa de solos do estado do Rio de Janeiro (MAB, 2000)

4.2.4. Parâmetro CN e Uso e Ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio Quitandinha

Na Figura 28 é notório que a região se destaca em relação ao uso e ocupação do solo, principalmente entre área urbanizada (37,7%) e área de vegetação (39,25%), restando uma área de aproximadamente 5 km² de solo exposto e rocha exposta e apenas 0,01 km² de água na bacia.

Figura 28 - Mapa de Uso e Ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio Quitandinha.



Nota: Datum: Sirgas 2000 / Dezembro, 2020

Fonte: O autor, 2021

Com uma área urbanizada relativamente extensa, a água de chuva tende a escoar superficialmente, sobrecarregando as redes de drenagem, fazendo com que cheguem mais rápidas no rio, contribuindo significativamente para o rápido transbordamento do rio Quitandinha. Uma vez que, o planejamento do uso do solo e o controle de inundações estão intimamente ligados, as ferramentas de modelagem servem como suporte para tomada de decisão.

Após definido as áreas e os percentuais do uso e ocupação do solo, foi possível obter o CN de cada classe assim como o CN ponderado da bacia hidrográfica, conforme pode ser observado na Tabela 12.

Tabela 12 - Dados de CN em relação ao tipo e ocupação do solo da bacia do rio Quitandinha.

Solo	Área (km ²)	CN	CN Ponderado
Vegetação	9,10	25	227,3780
Rocha exposta	2,38	98	233,6259
Solo exposto	2,98	68	202,7281
Área urbanizada	8,75	77	673,6916

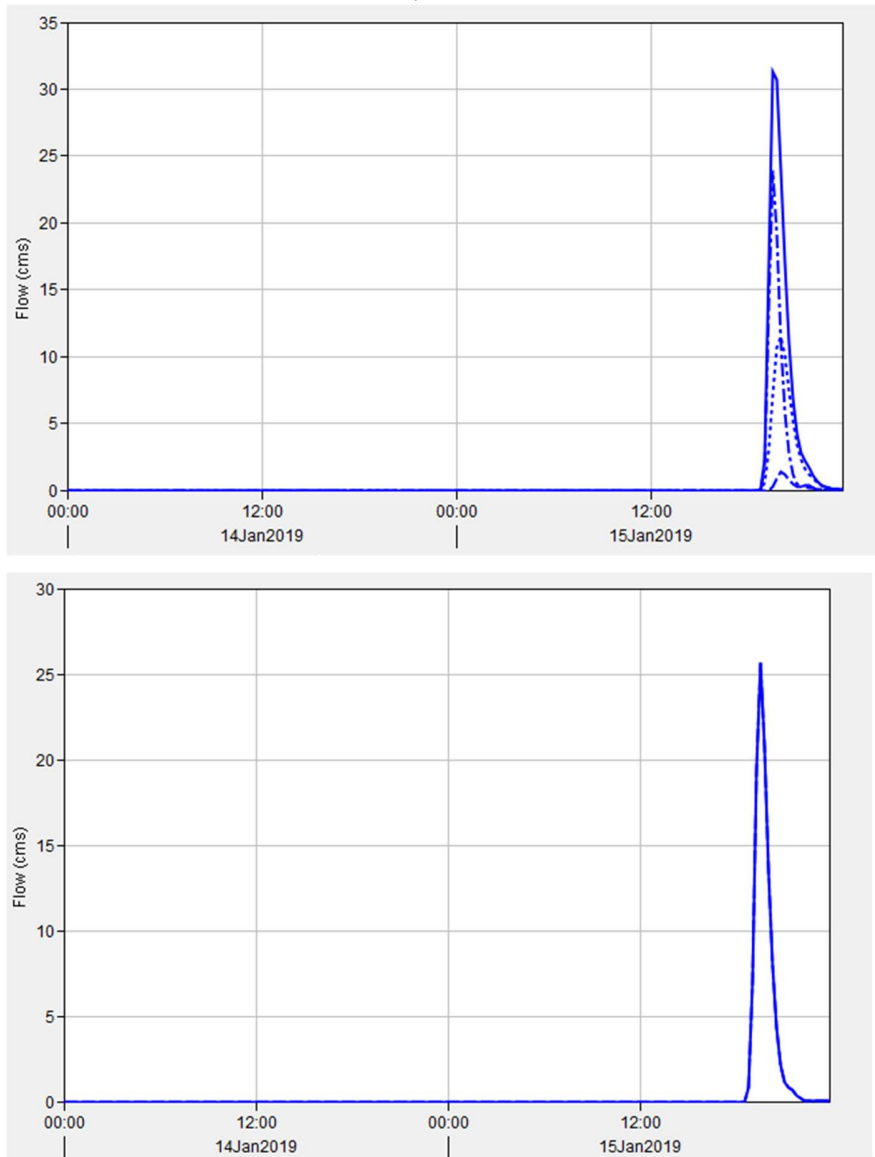
Fonte: O autor, 2021

A partir dos dados obtidos na Tabela 12 foi possível encontrar o valor de 57,6 de CN ponderado para toda a bacia hidrográfica do rio Quitandinha. De acordo com o dado de CN ponderado da bacia é possível identificar que quase 60% da água precipitada na região escorre superficialmente, o escoamento superficial na bacia é amenizado, pois a bacia possui quase 40% de áreas com vegetação.

4.3. Simulação de manchas de cheia na bacia hidrográfica do rio Quitandinha

No presente estudo os softwares HEC-HMS e HEC-RAS foram escolhidos para simular os processos que ocorrem na região central de Petrópolis, pertencente a bacia hidrográfica do rio Quitandinha. Foram simuladas as manchas de cheia provocadas durante o evento hidrometeorológico com o registro de maior transbordamento no rio Quitandinha em 2019. Cabe ressaltar que o ano de 2019 foi o último com dados disponibilizados pelo Sistema de Alerta de Cheias monitorado pelo INEA, provavelmente devido a paralização de serviços durante a pandemia da corona vírus no ano de 2020. Portanto, neste estudo foram adotados os dados mais recentes disponibilizados pelo órgão ambiental.

Figura 29 – Gráfico das vazões simuladas pelo HEC-HMS para o evento do dia 15/01/2019 nas estações de monitoramento do rio Quitandinha



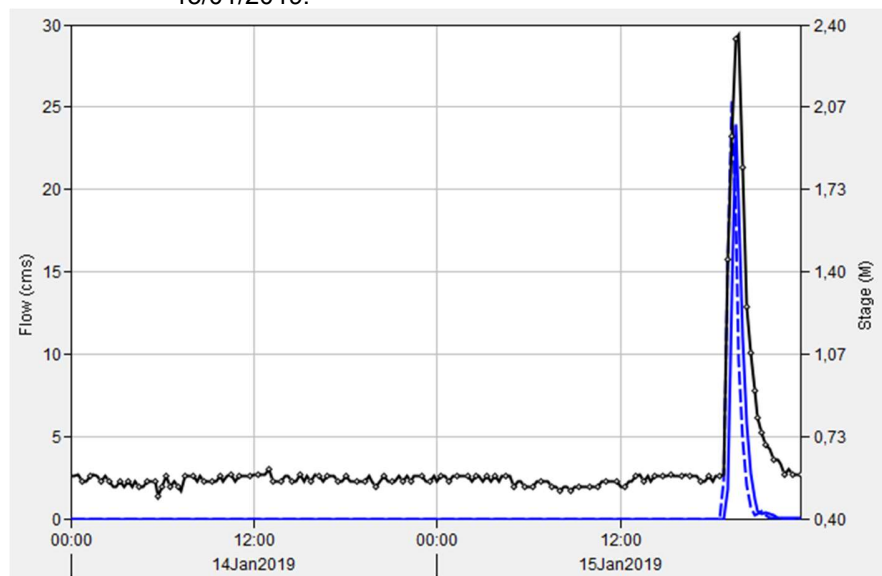
Legenda: (A) estação Centro, (B) estação Cel. Veiga
 Fonte: O autor, 2021

Como esperado, o maior transbordamento do rio Quitandinha foi registrado durante o verão (15/01/2019), alcançando uma cota de 2,36 metros na estação Centro e 3,55 metros na estação Cel. Veiga. Cabe mencionar que quanto maior o nível de transbordamento, maior são as extensões das áreas alagadas nesta bacia hidrográfica. Além disso, vale destacar a relação direta da vazão com a cota medida nas estações

pela régua linimétrica. Nesse sentido, foram simuladas pelo HEC-HMS as vazões em ambas estações para o dia do referido evento hidrometeorológico (Figura 29).

A Figura 30 ratifica a relação de proporcionalidade entre a vazão e o nível do rio. Uma vez, que as vazões simuladas para a estação Centro no dia 15/01/2019 seguiram um perfil bem ajustado de subida e descida do nível do rio Quitandinha no mesmo ponto de monitoramento.

Figura 30 - Gráfico das simulações no HEC-HMS na estação Centro no dia 15/01/2019.



Legenda: vazões simuladas (azul), alturas registradas (preto)

Fonte: O autor, 2021

A fim de validar o modelo HEC-HMS foi confrontada a maior vazão registrada no ano de 2019, que também foi medida durante o verão, com a vazão simulada neste mesmo dia na estação Centro. A Tabela 13 apresenta as vazões simuladas pelo HEC-HMS para o período da tarde na estação Centro no dia 13/02/2019.

Tabela 13 - Vazões simuladas pelo HEC-HMS para o período da tarde para estação Centro no dia 13/02/2019

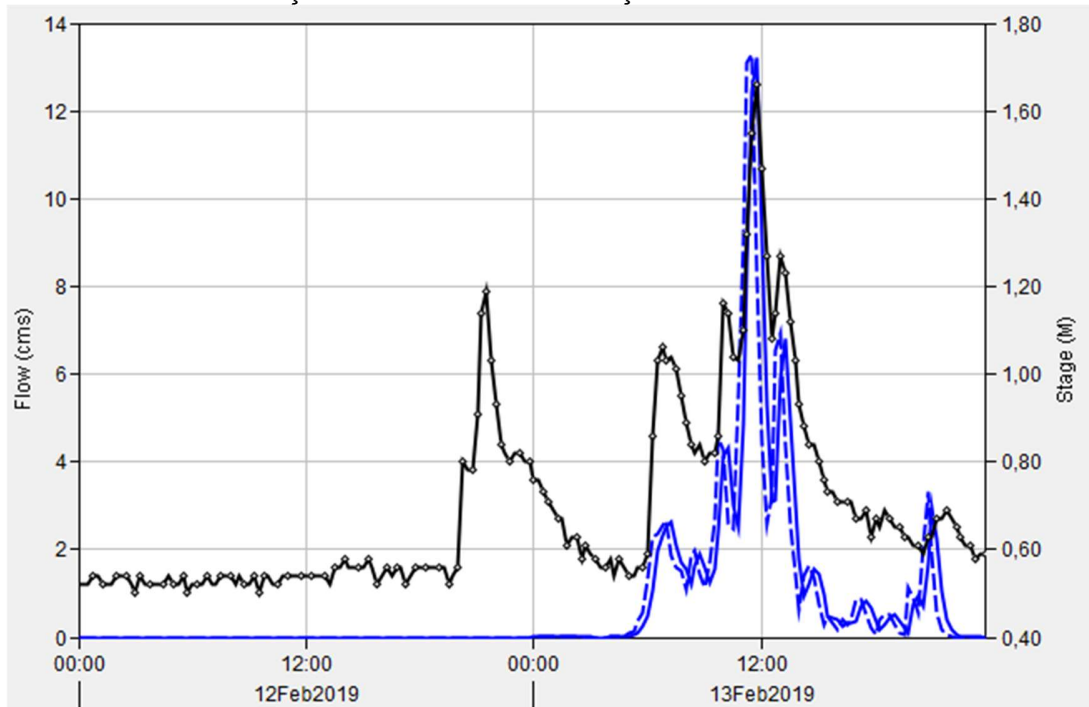
Período de ocorrência	Vazão simulada ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
12:15	43,4
12:30	33,7
12:45	28,7
13:00	31,5
13:15	33,2
13:30	29,6
13:45	22,4
14:00	15,0
14:15	9,5
14:30	7,6
14:45	8,3
15:00	9,2
15:15	7,9
15:30	5,5
15:45	4,2
16:00	3,8
16:15	4,5
16:30	5,0
16:45	4,7
17:00	3,9

Fonte: O autor, 2021

Foi calculada uma média dos valores simulados a cada 15 min no horário das 15h para obtenção da vazão média no mesmo horário em que ocorreu o monitoramento realizado pelo INEA. O resultado indicou que o modelo foi capaz de representar a realidade com uma exatidão de 95%, tendo em vista que a vazão simulada foi de $4,0 \text{ m s}^{-1}$ e a medida *in loco* de $4,22 \text{ m s}^{-1}$.

Assim como foi feito anteriormente, foi plotado um hidrograma com as vazões simuladas para a estação Centro no dia 13/02/2019 junto com os níveis do rio Quitandinha registrados no mesmo ponto de monitoramento (Figura 31).

Figura 31 - Gráfico das simulações com HEC-HMS na estação Centro no dia 13/02/2019

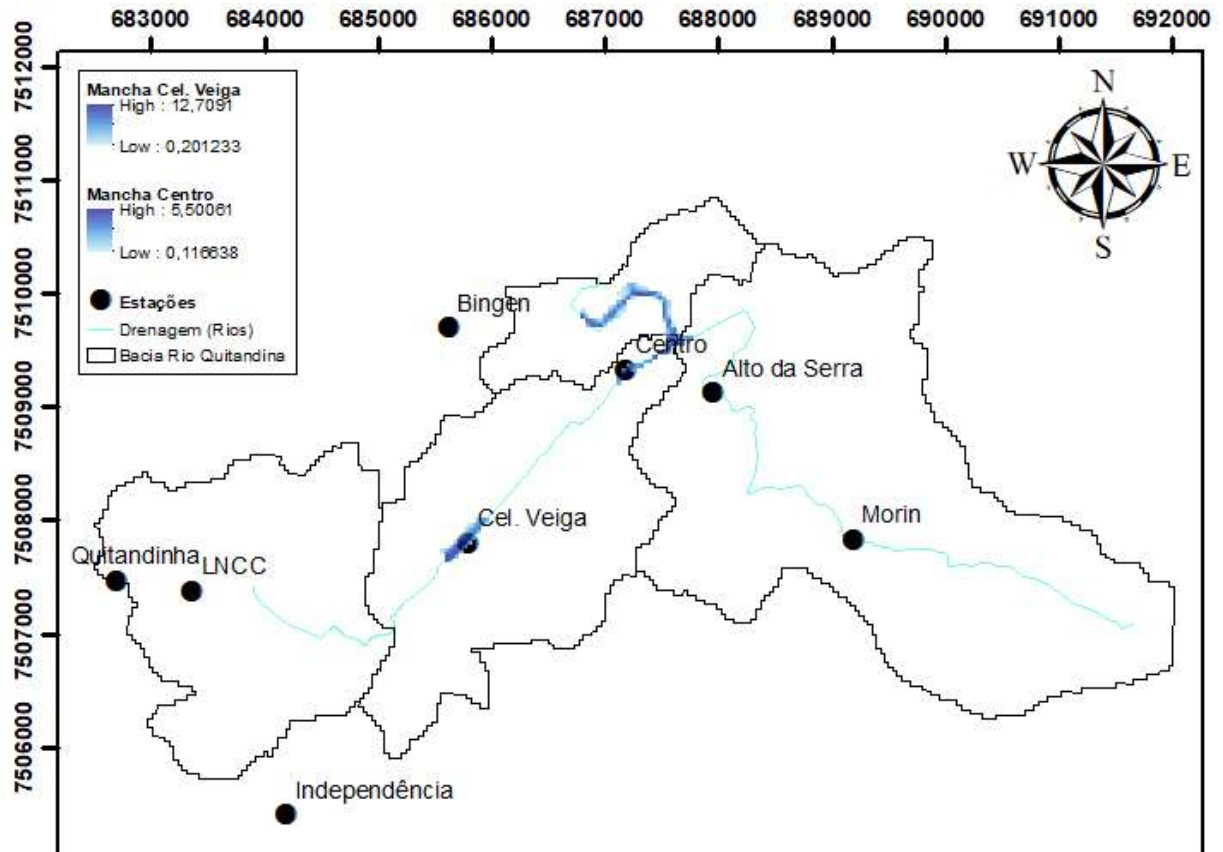


Legenda: vazões simuladas (azul); alturas registradas (preto)

Fonte: O autor, 2021

É possível observar na Figura 31 que apesar de o modelo não ter simulado vazões que acompanhassem a primeira subida de nível do rio Quitandinha, a modelagem foi capaz de simular com maior ajuste a segunda subida, onde foi registrado o seu maior nível. Segundo Lima Neto (2019), as simulações hidráulicas e os mapas das áreas de inundação de uma bacia resultam em delimitações mais precisas de extensão e profundidades do escoamento nas regiões afetadas quando há maior aproximação dos modelos hidrológicos com os dados observados. A Figura 32 apresenta o mapa com as manchas de cheias na bacia hidrográfica do rio Quitandinha simuladas no dia 15/01/2019.

Figura 32 - Mapa com o posicionamento das manchas de cheias na bacia hidrográfica do rio Quitandinha simuladas no dia 15/01/2019.



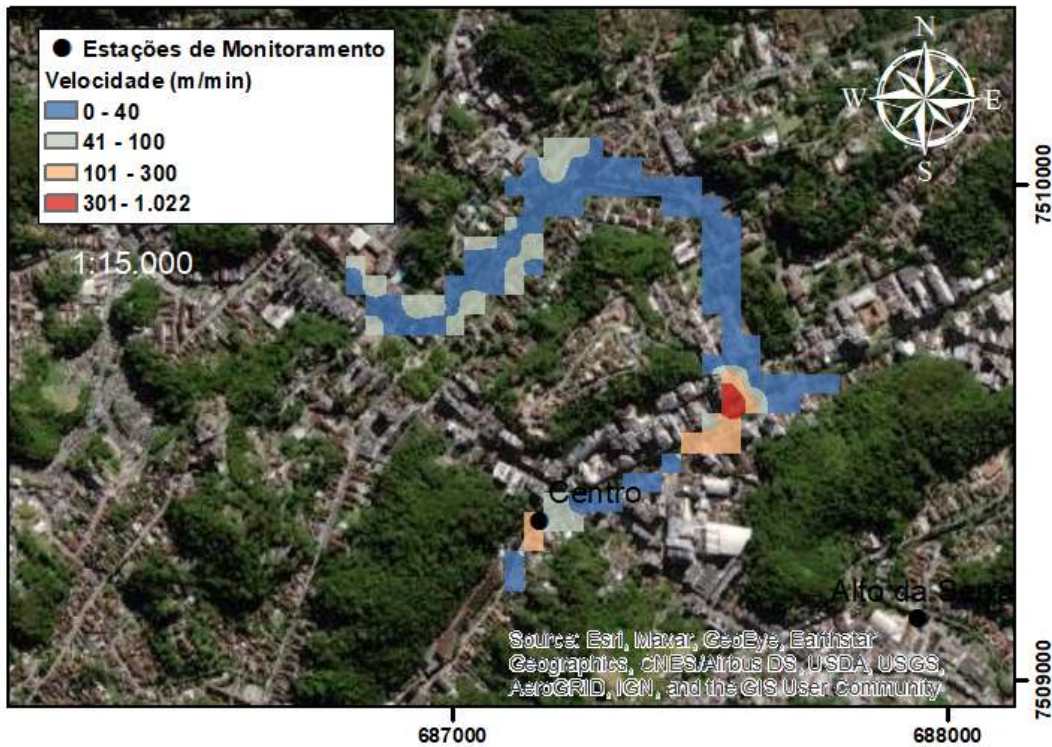
Nota: Datum: Sirgas 2000 / Junho, 2021

Fonte: O autor, 2021

As planícies de inundação são maiores e mais afetadas nas áreas de médio e baixo perfil longitudinal, devido a ocorrência de regiões mais planas, onde geralmente ocorre deposição de sedimentos carreados pelo escoamento superficial das chuvas, o que favorece o transborde e a formação de áreas alagadas (ANDRADE, 2017). Essa situação relatada por esse pesquisador ocorre nas áreas modeladas neste estudo. Além disso, a forma e a extensão dos canais definem a velocidade do escoamento e as condições em que ocorre o transbordamento da calha fluvial, pois quanto menos profundos e mais sujos forem os canais, maiores as chances de um extravasamento (ANDRADE, 2017). Aliado a isso, o rio Quitandinha ainda sofreu ações antrópicas de

urbanização, o que aumenta a velocidade da água em relação a canais naturais que possuem seus meandros preservados.

Figura 33 - Mapa de velocidade da água do rio Quitandinha nas proximidades da estação Centro simulado para o evento hidrometeorológico do dia 15/01/2019.



Nota: Datum: Sirgas 2000 / Junho, 2021

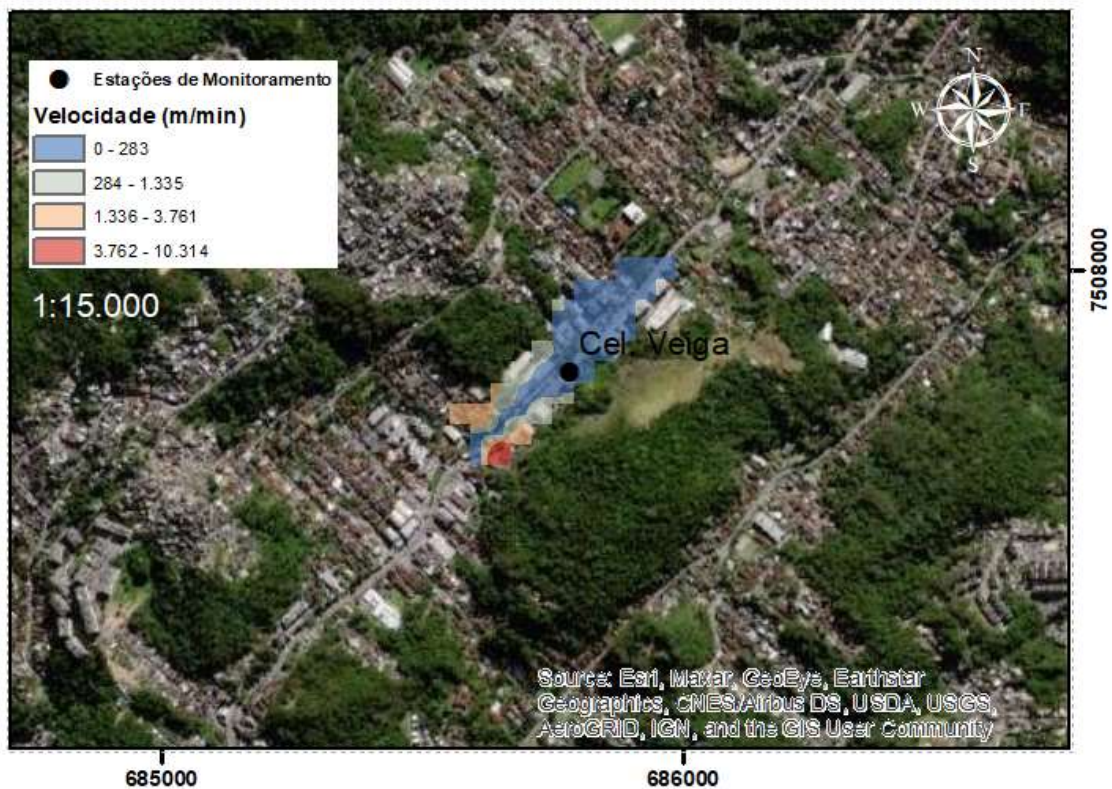
Fonte: O autor, 2021

Segundo a Figura 33, a velocidade simulada nas imediações da estação Centro, na região central de Petrópolis, pode chegar até pouco mais de 1000 m min^{-1} , imediatamente antes do seu encontro com o rio Palatinato, que vem em sentido contrário. Porém, sua velocidade simulada varia em maior parte do tempo entre 40 e 300 m min^{-1} .

O encontro frontal do rio Quitandinha com as águas do rio Palatinato causa uma perda de carga hidráulica significativa, fazendo com que a velocidade do rio caia para menos de 40 m min^{-1} no trecho que acompanha a rua da Imperatriz. Outro fator que interfere nesta redução de velocidade nesse trecho é a declividade negativa, conforme indicado por Gonzalez (2014). Após esse trecho, na avenida Koeller, a velocidade do rio volta a aumentar, registrando velocidade entre 41 e 100 m min^{-1} em alguns trechos

(Figura 32). A Prefeitura de Petrópolis, em seu Plano de Saneamento Básico (2014), apresenta como alternativa de solução para a redução das inundações nesta região, a criação de um túnel de aproximadamente 4 km, ligando o canal do Centro até a rua 13 de Maio, a fim de aumentar a velocidade e o escoamento do rio Quitandinha.

Figura 34 - Mapa de velocidade da água do rio Quitandinha nas proximidades da estação Cel. Veiga simulado para o evento hidrometeorológico do dia 15/01/2019.



Nota: Datum: Sirgas 2000 / Junho, 2021

Fonte: O autor, 2021

A velocidade do rio na rua Cel. Veiga durante o evento hidrometeorológico simulado chegou a 3.761 m min^{-1} . Antes da estação Cel. Veiga as velocidades predominantes variaram de 284 a 3.761 m min^{-1} . Porém, após esse ponto a velocidade predominante não ultrapassou 283 m min^{-1} . Cabe destacar que, antes da estação Cel. Veiga a seção transversal do rio é 0,5 m maior que após esse ponto. Portanto, era esperado que a velocidade após esse estreitamento aumentasse. Porém, em período de chuvas intensas, como o evento hidrometeorológico em questão, é sabido que o

leito do rio não suporta a vazão à montante, e acaba transbordando para a via principal, devido a presença de pontes e passagens que diminuem significativamente a altura do rio (PETRÓPOLIS, 2014), sendo assim com uma maior área de escoamento, a velocidade acaba por se reduzir, como mostra a Figura 34 causando grandes transtornos para a população. Vale ressaltar que a área representada em vermelho na Figura 34, diz respeito a velocidade que a água da chuva desce pela encosta com rocha exposta ao lado ao rio Quitandinha.

Em regiões com inclinações elevadas, tal como ocorre em Petrópolis, assim como em bacias pequenas, como a do rio Quitandinha, a resposta rápida às chuvas intensas é o fator principal na aceleração da propagação do escoamento. Um dos motivos associadas aos eventos de inundações, diz respeito a retirada da cobertura vegetal no entorno dos rios, pois essa redução afeta diretamente na permeabilidade do solo, aumentando a velocidade do escoamento das águas superficiais, reduzindo o tempo de concentração e propagação das ondas de cheias, o que antecipa e eleva o pico das cheias na bacia (LOU, 2010; TAO e BARROS, 2013; KVOCKA et al., 2017).

Figura 35 - Mancha de inundação com destaque na região central de Petrópolis simulado para o evento hidrometeorológico do dia 15/01/2019.



Nota: Datum: Sirgas 2000 / Junho, 2021
 Fonte: O autor, 2021

De acordo com a Figura 35, a modelagem indicou que as manchas de cheias na região central de Petrópolis atingiram a rua do Imperador, assim como parte de suas transversais, desde o seu início até a interseção com a avenida Dom Pedro I, seguindo pela a rua da Imperatriz, se estendendo até a avenida do Ipiranga. Além desses trechos, a mancha de inundação também foi observada por toda a rua Koeller, bem como suas transversais e parte da avenida Roberto Silveira.

Já na modelagem realizada nas proximidades da estação Cel. Veiga (Figura 36), mais especificamente na rua Coronel Veiga, iniciando na rua Marquês de Paraná e finalizando em frente ao Instituto Teológico Franciscano, indicou que a mancha de inundação alcançou todo esse trecho. A profundidade no trecho simulado variou de 0 a 13 metros.

Figura 36 - Mancha de inundação nas imediações da estação Cel. Veiga simulado para o evento hidrometeorológico do dia 15/01/2019.



Nota: Datum: Sirgas 2000 / Junho, 2021

Fonte: O autor, 2021

A profundidade máxima simulada no ponto onde se encontra a estação Cel. Veiga foi 3,72 metros, somente 17 cm a mais da registrada no dia pela estação. Logo, a modelagem do HEC-RAS apresentou uma exatidão de 95% para esse evento. Segundo Andrade (2017), uma dificuldade enfrentada na utilização do potencial máximo dos modelos de alto desempenho, como os softwares de modelagem HEC-HMS e HEC-RAS, são a qualidade dos dados de ocupação territorial e planialtimétricos alimentados. Pois, esses dados, quando existentes, não costumam ter a qualidade mínima requerida em termos de escala e resolução.

De posse do mapa com as manchas de cheia é possível mapear as áreas de maior risco de inundação na bacia do rio Quitandinha e assim poder buscar as medidas de mitigação de alagamentos mais adequadas para cada uma delas, ou até mesmo propor ações globais que remediem a ocorrência dos transbordamentos do rio Quitandinha.

4.4. Métodos de mitigação de inundações

Diante aos cenários simulados no item 5.3, é possível verificar uma recorrência de inundações em algumas áreas da bacia do rio Quitandinha, em especial no verão. Portanto, estes resultados revelam a necessidade de adaptação da cidade de Petrópolis para torná-la mais resiliente a eventos extremos e climáticos, a fim de sair rapidamente destas situações com os menores danos possíveis que seriam causados as comunidades circunvizinhas dos locais mapeados como críticos, ou seja, suscetíveis à ocorrência de manchas de inundações, ou ainda, tentar mitigar este tipo de vulnerabilidade aos cidadãos petropolitanos, através de soluções estruturais e não estruturais que minimizem os possíveis danos, priorizando o favorecimento da infiltração e o retardamento da propagação da onda de cheia. Para isso, segundo Andrade (2017), é necessário planejamento preventivo atrelado a estudos mais abrangentes de caracterização das áreas contribuintes e de possibilidades de ocorrência.

O planejamento, projeto e controle de estruturas hidráulicas, sistemas de monitoramento de recursos hídricos, previsão e alerta de inundações e atividades relacionadas às regulamentações das planícies das várzeas são estudos que podem ser desenvolvidos de posse ao mapeamento de áreas suscetíveis a inundações geradas a partir da modelagem hidráulica-hidrologica.

Rehman et al. (2012) afirmam que a estimativa de áreas de inundações com definição da onda de propagação é uma informação essencial para viabilizar o projeto de qualquer estrutura hidráulica. Além disso, a caracterização da onda de cheia ao longo de sua propagação por estes eventos extremos se mostra determinante como estratégia de mitigação, prevenção e alerta para os locais atingidos.

A previsão e alerta das inundações é uma das medidas não estruturais no que se refere ao controle desses eventos. Outros exemplos são planejamento da ocupação dos centros urbanos, mapeamento e zoneamento das áreas inundadas, seguros e políticas públicas municipais (Plano Diretor, legislação específica ou Código de Obras).

Além disso, existem as medidas estruturais tradicionais, que modificam o rio através de obras hidráulicas, tais como diques, canalizações e barragens (OLIVEIRA, 2010; DECINA, 2012).

Como foi descrito em Carneiro et al. (2010), a experiência internacional nas questões estratégicas de gestão de recursos hídricos aponta mudanças para o gerenciamento de inundações. Em alguns países da Europa, esta gestão é focada numa abordagem baseada no risco do evento e criação de políticas de proteção contra inundações. Esta mudança na estratégia influencia outras áreas, tais como planejamento urbano, métodos construtivos e projetos de conscientização social (KELLY; GARVIN, 2007).

Durante a webinar “Cidades Verdes”, organizada pelo Banco Nacional do Desenvolvimento e Sustentabilidade (BNDES), foi citada algumas alternativas já disponíveis para conter os grandes volumes de água acumulados por chuvas muito intensas e cada vez mais recorrentes, que provocariam inundações, potencialmente agravadas pelas mudanças climáticas, tais como, as bacias de contenção a montante, os parques lineares nas faixas marginais dos rios e a drenagem e reuso de águas de chuvas por estabelecimentos comerciais e industriais (BNDES, 2020). Todas essas alternativas tem a possibilidade de mitigação de inundações e são essenciais para adaptação de cidades com esse tipo de problema já diagnosticado.

As ações de mitigação podem iniciar por aquelas mais simples, sem custos diretos para os cofres públicos, como a criação de regulamentações específicas para retenção e reaproveitamento de águas de chuvas por grandes edificações comerciais e industriais quando da liberação de sua licença de instalação, ao invés de impermeabilizar os solos. Dessa forma, se reduziria a pressão hídrica sobre os rios do entorno, além de primar pela segurança hídrica da região, com o uso adequado dos recursos hídricos, indo de encontro com o conceito de cidades sustentáveis, que é um dos objetivos assumido pelo Brasil na Agenda 2030 de Desenvolvimento Sustentável.

A vantagem das medidas não estruturais é o caráter predominantemente preventivo que não necessita de grandes quantias de recursos para execução quando comparada às estruturais, que geralmente mobilizam muitos recursos financeiros (LIMA NETO, 2019).

Outra alternativa de mitigação que pode ser adotada pelos governos municipais é o estabelecimento de parcerias público-privadas para recriação de ambientes naturais nas faixas marginais dos rios, denominados “Parques Lineares” (Figura 37), que tem a finalidade recuperação de várzeas dos rios, além da criação de espaços de lazer em áreas urbanas (BNDES, 2020).

Figura 37 - Parque linear



Fonte: HORIZONTES ARQUITETURA, 2017.

Segundo o Website SOLUÇÕES PARA CIDADES (2021a), os Parques Lineares têm sido muito utilizados como instrumento de planejamento e gestão de áreas degradadas, que conciliam os aspectos urbanos e ambientais com as exigências da legislação e a realidade existente. Segundo o BNDES (2020), algumas cidades de São Paulo vêm adotando esta alternativa em diversos rios, a fim de mitigar as inundações nas áreas do entorno.

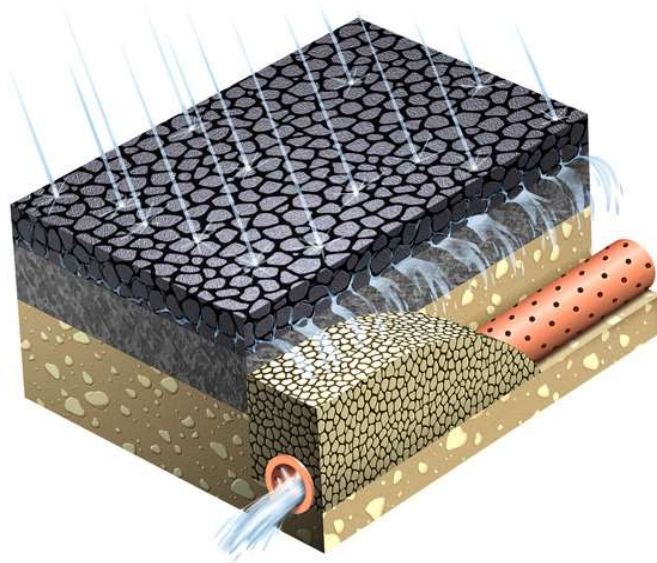
Os Parques Lineares constituem de áreas que agregam tanto as funções de uso humano, principalmente, às atividades de lazer, cultura e transporte não motorizado, como ciclovias e caminhos de pedestres, assim como o manejo de águas pluviais, aumentando a área de várzea dos rios, permitindo assim, o aumento das zonas de amortecimento de inundação e reduzindo a vazão da água durante as cheias do rio (HORIZONTES_ARQUITETURA, 2017; SOLUÇÕES PARA CIDADES, 2021a). Segundo Andrade (2017), terrenos cujo recobrimento se assemelha à paisagem natural

favorecem o escoamento superficial de velocidades reduzidas e a maior infiltração da água no solo.

Na bacia do rio Quitandinha a implantação de Parques Lineares não seria uma tarefa muito simples de ser colocada em prática, devido à alta densidade de habitações já instaladas as margens do rio, assim como a proximidade das vias com o leito do rio (Figura 4). Portanto, seria necessário fazer um mapeamento de áreas livres que permitam a sua implantação com o menor investimento, evitando a desapropriação de moradias.

Uma alternativa de mitigação de alagamentos já bem estabelecida para áreas urbanas é a pavimentação de vias com materiais permeáveis, ao invés do processo de asfaltamento tradicional. A utilização de pavimentos permeáveis (Figura 38) tem como objetivo reduzir ou retardar a vazão das águas pluviais drenadas superficialmente, promovendo uma mais rápida infiltração dessas águas no solo e contribuindo para o aumento da recarga de água subterrânea (SOLUÇÕES PARA AS CIDADES, 2020), ao invés de promover o escoamento superficial das mesmas até os rios ou sistemas de drenagem, contribuindo para problemas de inundações urbanas. Portanto, essa maior infiltração de água no solo reduz o volume total de água que entraria na rede de drenagem, diminuindo o risco de inundação nos sistemas a jusante e os impactos hidrológicos da urbanização (ENEGENHARIA360, 2020; SOLUÇÕES PARA AS CIDADES, 2020).

Figura 38 - Pavimento permeável



Fonte: ENGENHARIA360, 2020

A capacidade de infiltração do solo, diretamente relacionada à sua permeabilidade e umidade, define a proporção da chuva que irá se tornar escoamento de base, responsável pela recarga do lençol subterrâneo, e a proporção que se transformará em escoamento superficial direto, alimentando diretamente a vazão dos cursos d'água. Quanto maior a capacidade de infiltração do solo, menor o escoamento superficial resultante, ou seja, o alcance da inundação. A permeabilidade do solo influi diretamente na capacidade de infiltração, isto é, quanto mais permeável for o solo, maior será a velocidade do escoamento da água subterrânea e, em consequência, maior a quantidade de água que ele poderá absorver pela superfície por unidade de tempo (ANDRADE, 2017).

Em locais modificados pela ação antrópica, como por exemplo, em áreas urbanas, a impermeabilização do solo faz com que a retenção de água seja dificultada, contribuindo para a geração de escoamentos superficiais com maiores vazões e velocidades (ANDRADE, 2017). A substituição das características naturais de superfície das bacias urbanas por estruturas artificiais, que impermeabilizam o solo, é considerada como a principal causa do aumento dos eventos de cheias (MONTE et al., 2016).

No caso de Petrópolis, e principalmente na área delimitada pela bacia do rio Quitandinha, que é uma área urbana densamente ocupada, onde as superfícies destinadas ao sistema viário e às áreas de estacionamento ocupam espaços consideráveis, a pavimentação permeável é muito indicada, uma vez que a rede de drenagem não é capaz de absorver suficientemente o escoamento das águas pluviais, provocando constantes inundações em dias de chuvas intensas.

Uma outra solução estrutural para mitigação de inundações de uma cidade, que requer um maior investimento governamental, é a construção de bacias de contenção, também conhecidas como piscinões, que são espaços que acomodam as águas de cheias durante e após um evento de chuva intensa. Este tipo de alternativa é considerada uma drenagem urbana sustentável, focada no gerenciamento sustentável de inundações, que tende a substituir as alternativas tradicionais de construção de barreiras e de estruturas de proteção contra inundações (CARNEIRO et al., 2010).

Segundo BICHANÇA (2006), os piscinões têm a capacidade de reter o escoamento superficial, e podem ter lâmina d'água permanente ou serem secas nos períodos sem pluviosidade. Fisicamente, estas podem ser enterradas ou a céu aberto (Figura 39).

Os piscinões são estruturas de acumulação temporária das águas de chuva, que contribuem para a redução das inundações urbanas, especialmente em áreas altamente impermeabilizadas e densamente povoadas, onde o reforço ou ampliação dos canais e galerias de drenagem existentes pode tornar-se muito oneroso ou inviável (SOLUÇÕES PARA AS CIDADES, 2021b).

Figura 39 - Piscinão



Fonte: SOLUÇÕES PARA AS CIDADES, 2021b

Em Petrópolis, por ser uma região de serra, se torna viável até a implantação de bacias de contenção a montante, que retém as águas de chuva nos locais mais altos, evitando que essas águas e os sedimentos sejam carreados para áreas mais baixas, inundando-as e aumentando o nível de assoreamento dos rios.

5 CONCLUSÃO

O modelo HEC-RAS simulou com boa exatidão (95%) as manchas de inundações na bacia do rio Quitandinha no pior evento hidrometeorológico registrado no ano de 2019. Portanto, os resultados simulados pelos cenários de previsão de manchas de inundações simulados permitem mapear as áreas de maior risco de inundação na bacia do rio Quitandinha, o que ressalta a importância da adoção de modelos hidráulicos-hidrológicos, tal como o empregado neste estudo (HEC-HMS e HEC-RAS), como um instrumento relevante na gestão de riscos de inundações e desastres de uma cidade.

A modelagem de inundações é uma ferramenta muito importante, uma vez que esta pode fornecer previsões, que permitem ao gestor público estabelecer um limite físico, onde este poderá focar nos planos de contingenciamento ou mesmo em ações de mitigação.

O mapeamento da mancha de inundações de uma bacia hidrográfica tem como objetivo subsidiar a tomada de decisão dos gestores públicos para que planejem ações de adaptação para que a cidade se torne mais resiliente aos cenários com previsão de cheias dos seus rios, ou ainda possam mitigar os alagamentos das áreas mapeadas, adotando desde medidas pontuais e paliativas a medidas estruturantes que inibam a ocorrência de transbordamentos desses rios.

Conclui-se que, mesmo com a facilidade de uso dos modelos, é importante que se tenha senso crítico e conhecimento da teoria envolvida nos processos e nas variáveis simuladas, a fim de que os recursos disponíveis sejam corretamente enquadrados nos cálculos permitidos pelo software, de modo que, os resultados obtidos sejam fidedignos.

Por fim, a fim de melhorar a acurácia dos resultados de previsão das inundações torna-se importante um monitoramento contínuo das vazões e dos níveis de inundação alcançados na bacia do rio Quitandinha, para calibração e validação de modelos hidráulicos-hidrológicos, assim como um estudo geotécnico e topográfico

desta bacia, de forma a trazer informações mais detalhadas sobre a região, pois a permeabilidade do solo e a altimetria do terreno são fatores bastante relevantes para esses modelos.

Diante a experiência do trabalho realizado, sugere-se como sugestão de trabalhos futuros, tanto de forma complementar, quanto de forma a melhorar a qualidade da modelagem, as seguintes possibilidades de estudo:

- a) Mapeamento de espaços viáveis para construção de bacias de retenção a montante na bacia do rio Quitandinha;
- b) Mapeamento de áreas viáveis para construção de parques lineares na bacia do rio Quitandinha;
- c) Projeto estrutural de parques lineares na bacia do rio Quitandinha, a fim de mitigar as inundações na região central de Petrópolis;
- d) Projeto estrutural de bacias de retenção a montante a fim de mitigar os alagamentos na região serrana;
- e) Projeto estrutural de sistema de drenagem para as áreas críticas de inundação na bacia do rio Quitandinha;
- f) Monitoramento dos níveis de inundação nas regiões do entorno do rio Quitandinha para melhor acurácia de modelos de cheia;
- g) Estudo geotécnico do solo da bacia do rio Quitandinha para melhor calibração de modelos de cheias;
- h) Proposição de políticas públicas para mitigação de inundações na cidade de Petrópolis;
- i) Proposição de políticas públicas para adaptação e resiliência de cidades vulneráveis a inundações;
- j) Proposição de adoção de modelos de inundações como instrumento de gestão de riscos de alagamentos e desastres.

REFERÊNCIAS

- ABBOTT, M.B.; BATHURST, J.C.; CUNGE, J.A.; P.E. O'CONNELL; RASMUSSEN J. **An introduction to the European hydrological system-systeme hydrologique European 'SHE' 2: structure of a physically-based, distributed modeling system.** Asce Journal of Hydrologic Engineer, v. 87, p. 61-77, 1986.
- ALVARES, C.A; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; DE MORAES, G.J.L; SPAROVEK, G. **Köppen's climate classification map for Brazil.** Meteorol Z v.22, p.711–728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ANDRADE, C.J.S. **Modelagem hidráulica e hidrológica para diagnóstico de áreas susceptíveis a inundações com limitações de dados fisiográficos e hidrometeorológicos: estudo de caso Guidoal-MG.** Dissertação de mestrado em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2017.
- ARAÚJO, B.A.M.; SILVEIRA, C.S.; SOUZA, J.L.; JÚNIOR, J.V.F.M.; ALMEIDA, F.A.F.; STUDART, T.M.C. **Análise do Tempo de concentração em Função das Características Fisiografias em Bacias Urbanas.** In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009, Campo Grande. Anais do XVIII SBRH. Campo Grande: ABRH, 2011.
- ARONICA, G.T.; CANDELA, A.; FABIO, P.; SANTORO, M. **Estimation of flood inundation probabilities using global hazard indexes based on hydrodynamic variables.** Physics and Chemistry of the Earth, p. 119-129, 2012.
- BANCO MUNDIAL; **Relatório de danos materiais e prejuízos decorrentes de desastres naturais no Brasil: 1995 – 2019.** 2020.
- BANDEIRA, R.A.M.; CAMPOS, V.B.G.; BANDEIRA, A. P. F. **Uma visão da logística de atendimento à população atingida por desastre natural.** In: XXV Encontro da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), Belo Horizonte, 2011.
- BARBOSA JR, A.R. **Escoamento Superficial.** Apostila de hidrologia. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2015.

BASSANEZI, R. C. **Modelagem matemática: teoria e prática**. 1. ed. São Paulo: Contexto, 2015.

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento e Sustentabilidade, 2020. **Webinar: Cidades Verdes**. Disponível em:

https://www.youtube.com/watch?v=e_AGcby0sC0&feature=youtu.be (acessado em 02 de janeiro de 2021).

BRASIL, 2017. **Relatório nacional voluntário sobre os objetivos de desenvolvimento sustentável**. Disponível em:

https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/15801Brazil_Portuguese.pdf (acessado em 02 de janeiro de 2021).

BRITO, S. **Projetos e relatórios**. Ed. Imprensa Nacional, Rio de Janeiro, 1943.

BUTTS, M.B.; OVERGAARD, J.; VIAENE, P.; DUBICKI, A.; STROŃSKA, K.; SZALINSKA, W.; LEWANDOWSKI, A.; OLSZEWSKI, T.; KOLERSKI, T. **Flexible process-based hydrological modelling framework for flood forecasting – MIKE SHE**. In: International Conference of Innovation, Advances and Implementation of Flood Forecasting Technology. Tromsø, Norway, 2005.

CANHOLI, A.P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. Ed. Oficina de Textos, São Paulo, 302 p., 2005.

NELSON CARVALHO, D.B.C., STÊNIO, S.V. E JOSÉ MANUEAL, PEREIRA V. **Análise hidrodinâmica do estuário do rio Lima, Portugal, a partir de simulação numérica**. ARQUIVOS BRASILEIROS DE PSICOLOGIA, 12(3), 2017. DOI: 10.4136/1980-993X.

CASTILHO, L.V.; OLIVEIRA, P.M.C.; FABRIANI, C.B. **Análise de uma tragédia ambiental e a participação da população no equacionamento dos problemas de moradia: um estudo de caso da tragédia na região serrana do Rio de Janeiro**. VI Encontro Nacional da ANPPAS. Belém, 2012.

CHOW, V.T. **Hidráulica de canais abertos**. Ed. McGraw Hill. Bogotá, 1994.

CLIMATE-DATA, 2019. **Clima Petrópolis: Temperatura, Tempo e Dados climatológicos Petrópolis**. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/riode-janeiro/petropolis-4484/>. (Acessado em: 29 Jan 2020)

COBRADE - Classificação e Codificação Brasileira de Desastres, 2012. **Definições**. Disponível em: http://www.defesacivil.pr.gov.br/arquivos/File/Cobrade_comsimbologia.pdf (acesso em: 22 dezembro de 2020).

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. Tese de Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

CORRÊA, J.S. **Mapeamento de risco de inundações da área urbana da cidade de Cachoeiras de Macacu, RJ**. Dissertação de mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e do Meio Ambiente, da Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2017.

COSTA, J. **Aplicação de distintas discretizações espaciais no modelo hidrológico concentrado precipitação-vazão HEC-HMS**. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2002.

COUTINHO, M.M. **Avaliação do desempenho da modelagem hidráulica unidimensional e bidimensional na simulação de eventos de inundação em Colatina/ES**. Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2017. **Processos hidrológicos: inundações, enchentes, enxurradas e alagamentos na geração de áreas de risco**. Disponível em: <https://defesacivil.es.gov.br/Media/defesacivil/Capacitacao/Material%20Did%C3%A1tico/CBPRG%20-%202017/Processos%20Hidrol%C3%B3gicos%20-%20Inunda%C3%A7%C3%B5es,%20Enchentes,%20Enxurradas%20e%20Alagamentos%20na%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20de%20C3%81reas%20de%20Risco.pdf> (acessado em: 17 Jan 2021).

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

DECINA, T.G.T. e BRANDÃO, J.L.B. **Análise de desempenho de medidas estruturais e não estruturais de controle de inundações em uma bacia urbana.** Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, v.21, n. 1, p. 207–217, 2016.

DELTARES, 2010. **DELFT-FEWS DESCRIPTION-SCHERM.** Disponível em: <https://www.deltares.nl/en/software/delft3d-flexible-mesh-suite/> (acesso em: 15 de fevereiro de 2019).

DHI – Danish Hydraulic Institute, 2001. **MIKE SHE code verification and validation.** Disponível em: https://www.integratedhydro.com/MSHEVerification_Final%20report10_1_WAppendix.pdf (acesso em: 15 de fevereiro de 2019).

ENGENHARIA360, 2020. **Pavimentos permeáveis prometem diminuir significativamente as inundações urbanas.** Disponível em: <https://engenharia360.com/pavimentos-permeaveis-reduz-inundacoes/> (acessado em 03 de janeiro de 2021).

EPPINGHAUS, G. P. **O Plano Koeler.** Revista do Instituto Histórico de Petrópolis, 1969.

FERNANDEZ, P.; MOURATO, S.; MOREIRA, M. **Comparação dos modelos HEC RAS e LISFLOOD-FP na delimitação de zonas inundáveis.** Relatório final região hidrográfica V (RH-V). Vol. 34(Nº1), Rio de Janeiro, 2014.

FEYEN, L.; VÁZQUEZ, R.; CHRISTIAENS, K.; SELS, O.; FEYEN, J. **Application of a distributed physically-based hydrological model to a medium size catchment.** Hydrol. Earth Syst. Sci., 4, p. 47-63, 2000.

GÓES, V.C. **Simulação hidrológico-hidrodinâmica integrada ao geoprocessamento para avaliação da macrodenagem em centros urbanos.** Tese

de Doutorado em Engenharia Civil na Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

GÓES, V.C.; CIRILO, J.A.; DIESTEL, H. **Aplicação do modelo hidrológico MIKE SHE à bacia hidrográfica do riacho Mimoso em Pernambuco**. In: XVI Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos. Anais Do Xvi Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos, João Pessoa – PB, 2005.

GONZALEZ, F.C.G. **Projeto de drenagem sustentável para mitigação de cheias na bacia do rio Quitandinha, em Petrópolis, RJ**. Projeto de Graduação da Escola Politécnica do Rio de Janeiro, Rio De Janeiro, 2014.

GUERRA, A. **Catastrophic events in Petrópolis city (Rio de Janeiro state), between 1940 and 1990**. *Geo Journal* 37, p. 349–354, 1995. <https://doi.org/10.1007/BF00814015>

GUERRA, A.J.T.; DE OLIVEIRA, A.C.; OLIVEIRA, F.L.; GONÇALVES, L.F.H. **Mass movements in Petrópolis, Brazil**. *Geogr Rev* 20, p.34–37, 2007.

GUERRA, A.J.T. **Evolução histórico-geográfica da ocupação desordenada e movimentos de massa no município de Petrópolis, nas últimas décadas**. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, ano 8, n.1, 2007.

HAMMOURI, N.; EL-NAQA, A. **Hydrological modeling of ungauged wadis in arid environments using GIS: a case study of Wadi Madoneh in Jordan**. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v.24, n.2, p. 185-196, 2007.

HEC - *Hydrologic Engineering Center*, 1995. **HEC-RAS river analysis system: hydraulic reference manual**. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a311952.pdf> (acessado em 03 de janeiro de 2020).

HEC - *Hydrologic Engineering Center*, 2010. **HEC-RAS river analysis system: user's manual**. Disponível em: https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation/hecras_4.1_users_manual.pdf (acessado em 03 de janeiro de 2020).

HORIZONTES_ARQUITETURA, 2017. **Parques lineares no jornal o tempo.**

Disponível em:

<https://horizontesarquitetura.com.br/bloghorizontesarquitetura/2017/1/9/parques-lineares-no-jornal-o-tempo> (acessado em 03 de janeiro de 2021).

HYDROPROTECH. **Case study: the var catchment (french riviera - france).** In: Workshops on Physically-Based Hydrological Modelling. Nice, França, 2001.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. **Cidades e estados.**

Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados>> (acesso em: 02 de novembro 2019).

KVOCKA, D.; AHMADIAN, R.; FALCONER, R. A. **Flood Inundation Modelling of Flash Floods in Steep River Basins and Catchments.** Water, v. 9, n. 705, p. 1– 16, 2017.

LENCASTRE, A.; FRANCO, F.M. **Lições de Hidrologia.** Universidade Nova de Lisboa. Portugal, Lisboa, 1984

LIMA NETO, O.C. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica com intervalo de tempo sub-diário na bacia do rio Una em Pernambuco.** Dissertação de mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

LOU, R.F. **Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do rio Piabanha/RJ.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

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

MONTEIRO, L.R.; KOBIYAMA, M.; ZAMBRANO, F.C. **Mapeamento de perigo de inundação.** Trabalho Técnico do Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MORISOWA, M. **Streams: their dynamics and morphology**. Ed. Mcgray – Hill Book Company, 175 p., 1968.

NEGRÃO, A.C. **Modelagem hidrodinâmica unidimensional da passagem de onda de cheia em um córrego urbano considerado escoamento transcítico**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

NIELSEN, C. **The application of MIKE SHE to floodplain inundation and urban drainage assessment in South East Asia**. In: 4th Asia-Pacific Dhi Software Conference, Shanghai, 2006.

PETRÓPOLIS. **Plano de Contingência de Proteção e Defesa Civil – PLANCON 2013/2014**. PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS, 2013.

PETRÓPOLIS. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Petrópolis/RJ**. PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS, 2014.

PLACIDO, D.T. E CUNHA, S.B. **Enchentes na bacia do rio quitandinha (Petrópolis, RJ): 1966 a 2010**. In: VIII Simpósio Nacional de Geomorfologia (SINAGEO), Recife, 2010.

PONTES, P.R.M.; FAN, F.M.; FLEISCHMANN, A.S.; PAIVA, R.C.D.; BUARQUE, D.C.; SIQUEIRA, V.A.; COLLISCHONN, W. **MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS**. Environmental Modelling and Software v. 94, p. 1–20, 2017.

PORTAL G1, 2014. **Foto de inundação em Petrópolis**. Disponível em: <http://g1.globo.com/rj/regiao-serrana/noticia/2014/03/rio-quitandinha-transborda-na-coronel-veiga-em-petropolis-no-rj.html> (acessado em 15 de Janeiro de 2019).

RENNÓ, C. D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas**. Tese de Doutorado em Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 158p, 2003.

RIBEIRO NETO, A.R.; BATISTA, L.F.D.R.; COUTINHO, R.Q. **Methodologies for generation of hazard indicator maps and flood prone areas: municipality of Ipojuca / PE**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 21, n. 2, p. 377–390, 2016.

ROSI, A.; CANAVESI, V.; SEGONI, S.; DIAS NERY, T.; CATANI, F.; CASAGLI, N. **Landslides in the mountain region of Rio de Janeiro: a proposal for the semi-automated definition of multiple rainfall thresholds**. Geosciences v.9, p.203, 2019. <https://doi.org/10.3390/geosciences9050203>.

Rodrigues, C. M., Moreira, M., & Guimarães, R. C. **Apontamentos para as aulas de hidrologia**. Évora: Departamento de Engenharia Rural. 2011. Obtido de https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/4721/1/Apontamentos_hidrologia.pdf

SANTOS, K.A. **Utilização do modelo hidrodinâmico para mapeamento de áreas inundáveis**. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

SARGENT, R.G. **Verification and validation of simulation models**. Journal of Simulation, p. 12-24. 2013.

SARHADI, A.; SOLTANI, S.; MODARRES, R. **Probabilistic flood inundation mapping of ungauged rivers: Linking GIS techniques and frequency analysis**. Journal of Hydrology, p. 68-86, 2012.

SOLUÇÕES PARA CIDADES, 2020. **Projeto Técnico: Pavimento Permeável**. Disponível em: https://www.solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2013/10/AF_Pav%20Permeavel_web.pdf (acessado em 03 de janeiro de 2021).

SOLUÇÕES PARA CIDADES, 2021a. **Projeto técnico: Parques lineares como medidas de manejo de águas pluviais**. Disponível em: https://www.solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2013/10/AF_Parques%20Lineares_Web.pdf (acessado em 02 de janeiro de 2021).

SOLUÇÕES PARA AS CIDADES, 2021b. **Projetos Técnicos – Reservatórios de Detenção**. Disponível em: https://www.solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2013/09/AF_Reservatorios%20Deten_web.pdf (acessado em 20 de janeiro de 2021).

TAO, J. e BARROS, A. P. **Prospects for flash flood forecasting in mountainous regions – An investigation of Tropical Storm Fay in the Southern Appalachians.**

Journal of Hydrology, v. 506, p. 69–89, 2013.

TAULOIS, A. E. **História de Petrópolis.** Instituto Histórico de Petrópolis, 2007.

Disponível em: <http://www.petropolis.rj.gov.br/fct/index.php/turismo/conheca-petropolis/historia-de-petropolis.html?tmpl=component&print=1&page=> (acesso em 7 dezembro 2019).

TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos.** Ed. UFRGS/ABRH, Porto Alegre, 668p.,1998.

TUCCI, C.E.M. **Desenvolvimento dos recursos hídricos no Brasil.** REGA, v.2, n.2, 2005.

UN-ISDR - *International Strategy for Disaster Reduction*, 2009. **Terminology on**

Disaster Risk Reduction. Disponível em: <http://www.unisdr.org> (acesso em 15 maio de 2020).

US ACE - *Us Army Corps of Engineers*, 2016. **HEC-RAS.** Disponível em.

www.hec.usace.army.mil/software/ (acessado em: 20 de outubro de 2019).

VERÓ, A.P.; MIGUEZ, M.G.; AMARAL, V.M. **Controle de cheias em vila fraternidade (Duque de Caxias/RJ) – simulação matemática de cenários de projeto.** In: 26º

Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre, 2011.

ZOPE, P.E.; ELDHO, T.I. AND JOTHIPRAKASH, V. **Spatio-Temporal Analysis of**

Rainfall for Mumbai City, India. Journal of Environmental Research and Development, v.6, p. 545-553, 2012.

KENT, K.M. A Method for Estimating Volume and Rate of Runoff in Small Watersheds.

SCS-TP-149, USDA, Soil Conservation Service, Washington: D.C., 1973, 21 p.

MAB - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO. Estudo

Geoambiental do estado do Rio de Janeiro - Os Solos do Estado do Rio de Janeiro.

Brasília, 2000, pag. 45.

USDA - Urban Hydrology of Small Watersheds - TECHNICAL RELEASE 55 (TR-55),
NRCS, 1986.