

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**LUDMILLA FREITAS PEREIRA**

**SEGURANÇA DE BARRAGENS NO BRASIL: UM BREVE COMPARATIVO COM  
A LEGISLAÇÃO INTERNACIONAL E ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA  
COBERTURA DO SOLO DE APPs SOBRE MANCHAS DE INUNDAÇÃO  
(ESTUDO DE CASO DA PCH PEDRA FURADA, RIBEIRÃO – PE)**

Ilha Solteira  
2019

**LUDMILLA FREITAS PEREIRA**

**SEGURANÇA DE BARRAGENS NO BRASIL: UM BREVE  
COMPARATIVO COM A LEGISLAÇÃO INTERNACIONAL E ANÁLISE  
DA INFLUÊNCIA DA COBERTURA DO SOLO DE APPs SOBRE  
MANCHAS DE INUNDAÇÃO (ESTUDO DE CASO DA PCH PEDRA  
FURADA, RIBEIRÃO – PE)**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área de conhecimento: Recursos Hídricos e Tecnologia Ambiental.

Prof. Dr. César Gustavo da Rocha Lima  
**Orientador**

Prof. Dr. Mauro Mitsuuchi Tashima  
**Co-orientador**

Ilha Solteira  
2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P436s Pereira, Ludmilla Freitas .  
Segurança de barragens no Brasil: um breve comparativo com a legislação internacional e análise da influência da cobertura do solo de APPs sobre manchas de inundação: estudo de caso da PCH Pedra Furada, Ribeirão – PE / Ludmilla Freitas Pereira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019  
125 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia . Área de conhecimento: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, 2019

Orientador: César Gustavo da Rocha Lima

Co-orientador: Mauro Mitsuuchi Tashima

Inclui bibliografia

1. Segurança de barragens. 2. Legislação. 3. Cobertura do solo.  
4. Coeficiente de rugosidade de Manning. 5. Áreas de preservação permanente.  
6. HEC-RAS.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** SEGURANÇA DE BARRAGENS NO BRASIL: UM BREVE COMPARATIVO COM A LEGISLAÇÃO INTERNACIONAL E ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA COBERTURA DO SOLO DE APPs SOBRE MANCHAS DE INUNDAÇÃO (ESTUDO DE CASO DA PCH PEDRA FURADA, RIBEIRÃO – PE)

**AUTORA:** LUDMILLA FREITAS PEREIRA


**ORIENTADOR:** CESAR GUSTAVO DA ROCHA LIMA

**COORIENTADOR:** MAURO MITSUUCHI TASHIMA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em ENGENHARIA CIVIL, área: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. CESAR GUSTAVO DA ROCHA LIMA  
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. JOSE AUGUSTO DE LOLLO  
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. JOSÉ CÂNDIDO STEVAUX  
Programa de Pós-graduação em Geografia / Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS

Ilha Solteira, 30 de julho de 2019

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaria de agradecer à Deus por sempre estar me guiando e me concedendo força.

Agradeço também à minha família, que sempre me acompanhou de perto e em cada passo, principalmente aos meus pais, Nara e Kenes, pela confiança dada às minhas decisões e escolhas, e por nunca medirem esforços para tornar meus sonhos em realidade. Agradeço ao meu irmão, Felipe, pela amizade e momentos de descontração; e ao Matheus, pelo apoio e companheirismo ao longo de todas as etapas.

Agradeço, imensamente, aos professores Dr. Mauro Mitsuuchi Tashima e Dr. César Gustavo da Rocha Lima pela disposição e compromisso em me auxiliarem a desenvolver esta pesquisa e muitos outros trabalhos, me incentivando e me apoiando em todas as ideias, bem como me estimulando a buscar resultados inovadores e melhores. Agradeço também ao professor Dr. José Augusto de Lollo pela parceria ao longo de trabalhos desenvolvidos, pelas contribuições no exame de qualificação e pelo aceite de convite para ser parte da banca examinadora.

Agradeço à professora Dr.<sup>a</sup> Liliane Lazzari Albertin pelas contribuições no exame de qualificação e ao professor Dr. José Cândido Stevaux pela disposição em fazer parte da banca examinadora deste trabalho.

Agradeço aos amigos de longa data, àqueles que a graduação e a pós me trouxeram e àqueles que a vida profissional me trouxe, porque sem eles a caminhada não teria sido mais leve e divertida.

Agradeço à toda equipe da Geometrisa, empresa na qual iniciei a minha carreira profissional, sem a qual inevitavelmente não teria descoberto minhas afinidades e aptidões. Agradeço por me auxiliarem a equilibrar a vida acadêmica e profissional e também à cada membro que já passou pela empresa pelos momentos de aprendizado e amizade.

Agradeço à empresa Atiaia Energia por conceder autorização para utilizar dados de levantamentos de campo para subsidiar os resultados desta

pesquisa. Sem esta contribuição, não teria sido possível desenvolver este estudo.

Por fim, gostaria de agradecer à UNESP e, individualmente, à cada professor, técnico e funcionário, pelo ensino de qualidade conferido a mim, há pouco mais de sete anos.

“A vida só passa rápido para quem passa por ela. Para aquele que vive com intensidade, a vida demora a passar e o tempo se multiplica, propiciando a oportunidade para fazer tudo o que realmente importa”. Caio Carneiro.

## RESUMO

O Brasil, frente aos acidentes ocorridos em Mariana – MG (2015) e em Brumadinho – MG (2019), tem vivenciado inúmeras discussões no que tange à assuntos regulatórios e à confiabilidade das barragens construídas no país. Neste trabalho, inicialmente, fez-se um breve comparativo entre a legislação brasileira e alguns normativos internacionais (China, Portugal, Estados Unidos e África do Sul) sobre segurança de barragens, observando-se a existência de diferentes aspectos abordados entre eles. A Política Nacional de Segurança de Barragens se demonstrou uma das regulamentações menos rígidas entre as analisadas quanto a pré-requisitos técnicos para sua aplicação, deixando grande parte das barragens de pequeno porte dispensadas do cumprimento de algumas obrigações. Além disto, a legislação federal brasileira foi implementada há menos de uma década, o que implica, atualmente, em uma dificuldade muito grande do empreendedor, dos órgãos fiscalizadores e do governo federal a se adaptarem a possuir esta cultura de segurança de barragens. Diante da interface destas construções com o meio ambiente, faz-se necessário um monitoramento constante das estruturas por uma equipe multidisciplinar e um programa de segurança consistente que vise garantir a integridade do meio ambiente nas áreas de influência das barragens, bem como resguardar o bem-estar e a vida da população situada a jusante. O uso de funções matemáticas e softwares para o mapeamento das áreas sujeitas aos riscos impostos pelas barragens é um avanço grandioso no aspecto de segurança destas estruturas. Neste contexto, o presente estudo teve por objetivo prático principal analisar a influência da cobertura do solo das áreas de preservação permanente (APPs) a jusante da barragem da PCH Pedra Furada, localizada no município de Ribeirão no estado de Pernambuco, sobre características de manchas de inundação referentes a vazões hipotéticas para tempos de retorno de 10 e 10.000 anos, defluentes deste empreendimento. Foram utilizados dados de levantamento de campo como ortofotos e topografia (obtidas por VANT) assim como informações batimétricas cedidos pela empresa proprietária do empreendimento e, também, dados hidrológicos da Agência Nacional de Águas. Por meio da simulação do modelo hidrodinâmico bidimensional HEC-RAS 5.0.7, em regime transiente, variou-se os coeficientes de rugosidade (Manning) das faixas marginais ao rio Sirinhaém, fazendo-se análises em seções distantes 5, 15 e 25 km do barramento. Os resultados demonstraram que para um aumento de oito vezes da rugosidade da APP, reduziu-se o tempo de chegada de onda em 2h50 min para o cenário de TR=10 anos e em 2h10min para o cenário de TR=10.000 anos na seção distante 25 km da barragem. Já para a seção mais próxima ao barramento, este aumento de rugosidade levou ao acréscimo de profundidades da água de, cerca de, 2 metros dentro da calha fluvial, para ambos cenários de vazão. Assim, conclui-se que APPs vegetadas representam menor intensidade sobre planícies de inundações mais próximas do barramento, enquanto que, para as planícies mais distantes, representam uma janela de tempo maior para a implementação de ações contingenciais, caracterizando-se, assim, como uma boa contribuição para o rol de elementos de segurança de barragens.



**Palavras-chave:** Segurança de barragens. Legislação. Cobertura do solo. Coeficiente de rugosidade de Manning. Áreas de preservação permanente. HEC-RAS. Modelo 2D. Inundação.

## ABSTRACT

Brazil, faced with the accidents that occurred in Mariana - MG (2015) and in Brumadinho - MG (2019), has experienced numerous discussions regarding regulatory issues and the reliability of the dams built in the country. In this work, it was made a brief comparison between Brazilian legislation and some international regulations (China, Portugal, United States and South Africa) on dam safety, observing the existence of different aspects addressed among them. The National Dams Safety Policy demonstrated one of the less rigid regulations among those analyzed regarding technical prerequisites for their application, leaving most of the small dams exempted from compliance with certain obligations. In addition, Brazilian federal legislation was implemented less than a decade ago, which currently implies a great difficulty for the entrepreneur, the inspection agencies and the federal government to adapt to having this dam safety culture. In view of the interface of these constructions with the environment, it is necessary a constant monitoring of the structures by a multidisciplinary team and a consistent safety program that aims to guarantee the integrity of the environment in the areas of influence of the dams, as well as to protect the well-being and the life of the downstream population. The use of mathematical functions and softwares for the mapping of the areas subject to the risks imposed by the dams is a great advance in the safety aspect of these structures. In this context, the main objective of the present study was to analyze the influence of the soil cover of the permanent preservation areas (PPAs) downstream of the Pedra Furada Hydroelectric Power Plant, located in the city of Ribeirão in the state of Pernambuco, hypothesis flow rates for return times of 10 and 10,000 years, defluents of this dam. Field survey data such as orthophotos and topography (obtained by drone) were used as well as bathymetric information provided by the company that owns the project and hydrological data from the National Water Agency. By means of the simulation of the two-dimensional hydrodynamic model HEC-RAS 5.0.7, in the transient regime, the roughness coefficients (Manning) of the marginal banks of the Sirinhaém river were varied, being analyzed in sections distant 5, 15 and 25 km of the dam. The results showed that for an eight-fold increase in PPA roughness the wave arrival time was reduced in 2h50 min for the 10-year scenario and at 2h10min for the 10,000-year scenario in the 25 km distant section of the dam. As for the section closest to the dam, this increase of roughness led to the addition of water depths of about 2 meters inside the rain gutter, for both flow scenarios. Thus, we conclude that vegetated PPAs represent a lower intensity on flood plains closer to the dam, whereas for the more distant plains, they represent a larger window of time for the implementation of contingency actions, is thus a good contribution to the role of dam safety elements.

**Key words:** Dams safety. Legislation. Soil coverage. Manning's roughness coefficients. Permanent preservation areas. HEC-RAS. Model 2D. Flood.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	- Rastro de lama nas proximidades da barragem de Fundão e da Mina Feijão decorrente de seus rompimentos .....	21
<b>Figura 2</b>	- Erosão na estrutura de concreto do vertedouro da barragem de Oroville .....	22
<b>Figura 3</b>	- Quantificação de causas prováveis de acidentes e incidentes registrados pela ANA entre 2010 e 2017 .....	26
<b>Figura 4</b>	- Resumo do processo de modelagem hidrodinâmica e caracterização da mancha de inundação gerada .....	52
<b>Figura 5</b>	- Bacia hidrográfica contribuinte e localização da PCH Pedra Furada	58
<b>Figura 6</b>	- Ortofoto da área de estudo .....	61
<b>Figura 7</b>	- Modelo Digital de Terreno (TIN) da área de estudo.....	62
<b>Figura 8</b>	- Postos fluviométricos consultados no Hidroweb .....	64
<b>Figura 9</b>	- Processo de simulação de vazões extremas para diferentes tempos de retorno.....	65
<b>Figura 10</b>	- Ilustração do processo de segmentação por meio do software eCognition .....	70
<b>Figura 11</b>	- Classificação do uso e ocupação do solo da situação real área de estudo .....	73
<b>Figura 12</b>	- Classificação da cobertura do solo para a situação real da APP da área de estudo.....	74
<b>Figura 13</b>	- Síntese das atividades desenvolvidas no HEC-RAS 2D .....	75
<b>Figura 14</b>	- Inserção do MDT referente à área de estudo no software HEC-RAS	76
<b>Figura 15</b>	- Malha de escoamento bidimensional com células de 20mx20m.....	77
<b>Figura 16</b>	- Alinhamento das células com as margens do rio para melhor representatividade do relevo.....	78
<b>Figura 17</b>	- BC Line de montante sobre o vertedouro da PCH Pedra Furada	79
<b>Figura 18</b>	- BC Line de jusante na seção final da área de estudo .....	79
<b>Figura 19</b>	- Inserção de conexão interna de fluxo para representar as pontes	80
<b>Figura 20</b>	- Ferramenta de edição de conexões internas .....	81
<b>Figura 21</b>	- Setores do município de Gameleira atingidos pelas cheias de 2010 e 2017 .....	83
<b>Figura 22</b>	- Curva de descarga do posto fluviométrico Engenho Bento no rio Sirinhaém .....	85
<b>Figura 23</b>	- Curva de descarga do posto fluviométrico José Mariano no rio Amaragi .....	85
<b>Figura 24</b>	- Espacialização dos coeficientes de Manning calibrados .....	89
<b>Figura 25</b>	- Mapa de inundação para um TR = 10 anos utilizando-se coeficientes calibrados .....	94
<b>Figura 26</b>	- Mapa de inundação para um TR = 10.000 anos utilizando-se coeficientes calibrados .....	95
<b>Figura 27</b>	- Mapa de inundação para uma TR = 10 anos utilizando-se coeficientes teóricos .....	96

<b>Figura 28</b>	-	Mapa de inundação para uma TR = 10.000 anos utilizando-se coeficientes teóricos .....	97
<b>Figura 29</b>	-	Comparativo entre a área alagada pelo TR=10 anos com coeficientes teóricos e calibrados .....	98
<b>Figura 30</b>	-	Comparativo entre a área alagada pelo TR=10.000 anos com coeficientes teóricos e calibrados .....	99
<b>Figura 31</b>	-	Mapa de inundação para um TR = 10 anos utilizando-se coeficientes calibrados, com a inserção das pontes na geometria....	101
<b>Figura 32</b>	-	Mapa de inundação para um TR = 10.000 anos utilizando-se coeficientes calibrados, com a inserção das pontes na geometria....	102
<b>Figura 33</b>	-	Comparativo entre a área alagada pelo TR=10 anos utilizando-se coeficientes calibrados, com/sem a inserção das pontes na geometria .....	103
<b>Figura 34</b>	-	Comparativo entre a área alagada pelo TR=10.000 anos utilizando-se coeficientes calibrados, com/sem a inserção das pontes na geometria .....	104
<b>Figura 35</b>	-	Resultados da simulação para TR = 10 anos (Seção 5 km) .....	105
<b>Figura 36</b>	-	Resultados da simulação para TR = 10 anos (Seção 15 km) .....	106
<b>Figura 37</b>	-	Resultados da simulação para TR = 10 anos (Seção 25 km) .....	106
<b>Figura 38</b>	-	Perfil longitudinal do trecho de estudo .....	108
<b>Figura 39</b>	-	Resultados da simulação para TR = 10.000 anos (Seção 5 km) .....	109
<b>Figura 40</b>	-	Resultados da simulação para TR = 10.000 anos (Seção 15 km) ....	110
<b>Figura 41</b>	-	Resultados da simulação para TR = 10.000 anos (Seção 25 km) ....	110

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b>	- Distribuição das barragens no Brasil de acordo com o seu uso .....	18
<b>Quadro 2</b>	- Acidentes e incidentes registrados pela ANA entre 2010 e 2017 .....	23
<b>Quadro 3</b>	- Normativos sobre segurança de barragens na China .....	35
<b>Quadro 4</b>	- Classificação das barragens portuguesas .....	39
<b>Quadro 5</b>	- Resumo comparativo entre a legislação internacional sobre segurança de barragens .....	43
<b>Quadro 6</b>	- Tempos de recorrência mínimos recomendados pela ANA para as cheias de projeto .....	49
<b>Quadro 7</b>	- Comparação de valores de coeficientes de rugosidade de superfícies encontrados na literatura .....	54
<b>Quadro 8</b>	- Coeficientes de rugosidade (Manning) para diferentes classes e materiais .....	54
<b>Quadro 9</b>	- Caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Pedra Furada .....	59
<b>Quadro 10</b>	- Especificações técnicas dos postos fluviométricos escolhidos .....	63
<b>Quadro 11</b>	- Série de vazões máximas anuais para o posto fluviométrico Engenho Bento .....	66
<b>Quadro 12</b>	- Série de máximos anuais corrigidos .....	67
<b>Quadro 13</b>	- Análise de estatística descritiva da série de máximos anuais .....	68
<b>Quadro 14</b>	- Resultados do estudo de frequência de cheias .....	69
<b>Quadro 15</b>	- Chave de classificação de imagens .....	71
<b>Quadro 16</b>	- Quantificação das classes de cobertura do solo para a situação real da área de estudo .....	72
<b>Quadro 17</b>	- Quantificação das classes para situação real de cobertura do solo da área de preservação permanente ...	72
<b>Quadro 18</b>	- Comparativo entre vazões observadas e simuladas .....	87
<b>Quadro 19</b>	- Coeficientes de rugosidade calibrados .....	88
<b>Quadro 20</b>	- Coeficientes de rugosidade baseados na literatura .....	90
<b>Quadro 21</b>	- Cenários de modelagens hidrodinâmicas .....	92
<b>Quadro 22</b>	- Comparação entre as áreas alagadas pelas simulações com coeficientes teóricos e calibrados .....	93
<b>Quadro 23</b>	- Comparação entre as áreas alagadas pelas simulações com/sem a inserção de pontes .....	100

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas
AGERH	Agência Estadual de Recursos Hídricos
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANM	Agência Nacional de Mineração
ANPC	Autoridade Nacional de Proteção Civil
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
APP	Área de Preservação Permanente
ASDSO	Association of State Dam Safety Officials
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CGSB	Centro de Gerenciamento de Segurança de Barragens
CMSB	Centro de Monitoramento de Segurança de Barragens
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CSB	Comissão de Segurança de Barragens
CSRES	China Standards on Review Engagements
CSSGB	Centro de Supervisão de Segurança de Grandes Barragens
DSO	Dam Safety Office
EEE	Empresa Estatal de Energia
FEMA	Federal Emergency Management Agency
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center's – River Analysis System
ICODS	Interagency Committee on Dam Safety
ICOLD	International Commission On Large Dams
IMASUL	Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul
INEMA	Instituto Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MDT	Modelo Digital de Terreno
MRH	Ministério de Recursos Hídricos
NATURATINS	Instituto Natureza do Tocantins
NDSP	National Dam Safety Program
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PSB	Plano de Segurança de Barragens

RPB	Regulamento de Pequenas Barragens
RSB	Regulamento de Segurança de Barragens
SDS	Secretaria de Desenvolvimento Econômico Sustentável
SEDAM	Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental
SEMA	Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SEMAD	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
SEMARH	Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos
SINIMA	Sistema Nacional de Informações sobre Meio Ambiente
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
SRH	Secretaria dos Recursos Hídricos
TIN	Triangulated irregular network
TR	Tempo de Retorno
UHE	Usina Hidrelétrica
UTM	Universal Transversa de Mercator
VANT	Veículo aéreo não tripulado

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	15
2	OBJETIVOS.....	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1	BARRAGENS.....	18
3.2	LEGISLAÇÃO SOBRE SEGURANÇA DE BARRAGENS .....	27
3.2.1	<b>Brasil .....</b>	<b>28</b>
3.2.2	<b>Estados Unidos .....</b>	<b>31</b>
3.2.3	<b>China .....</b>	<b>33</b>
3.2.4	<b>Portugal.....</b>	<b>38</b>
3.2.5	<b>África do Sul .....</b>	<b>41</b>
3.2.6	<b>Análise da legislação internacional.....</b>	<b>42</b>
3.3	ESTUDOS HIDROLÓGICOS .....	48
3.4	MODELAGEM HIDRODINÂMICA .....	50
3.5	COEFICIENTE DE RUGOSIDADE .....	52
3.5.1	<b>Conceitos .....</b>	<b>52</b>
3.5.2	<b>Efeito sobre caracterização de cheias .....</b>	<b>56</b>
4	MATERIAIS E MÉTODOS .....	58
4.1	ÁREA DE ESTUDO.....	58
4.2	BASE DE DADOS UTILIZADA.....	60
4.2.1	<b>Levantamentos de campo .....</b>	<b>60</b>
4.2.2	<b>Dados históricos de hidrologia.....</b>	<b>63</b>
4.3	DETERMINAÇÃO DAS VAZÕES DE CHEIA.....	65
4.4	CLASSIFICAÇÃO DA COBERTURA DO SOLO DA ÁREA A JUSANTE .....	69
4.5	MODELAGEM HIDRODINÂMICA .....	75
4.5.1	<b>Resumo das etapas.....</b>	<b>75</b>
4.5.2	<b>Inserção de dados geométricos.....</b>	<b>76</b>
4.5.2.1	<i>Modelo digital de terreno.....</i>	<i>76</i>
4.5.2.2	<i>Malha de Escoamento.....</i>	<i>76</i>
4.5.2.3	<i>Inserção das seções de montante e jusante.....</i>	<i>78</i>
4.5.2.4	<i>Inserção das pontes.....</i>	<i>79</i>
4.5.2.5	<i>Inserção dos coeficientes de Manning.....</i>	<i>81</i>
4.5.3	<b>Definição do tempo computacional.....</b>	<b>90</b>
4.5.4	<b>Definição dos dados de escoamento .....</b>	<b>90</b>
4.5.4.1	<i>Montante .....</i>	<i>91</i>
4.5.4.2	<i>Jusante.....</i>	<i>91</i>



<b>4.5.5</b>	<b>Definição dos cenários de simulação .....</b>	<b>91</b>
<b>4.5.6</b>	<b>Exportação dos resultados .....</b>	<b>92</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>93</b>
5.1	COEFICIENTES DE RUGOSIDADE CALIBRADOS E TEÓRICOS .....	93
5.2	PONTES INSERIDAS NO MODELO .....	100
5.3	COBERTURA DE SOLO DA APP .....	105
<b>5.3.1</b>	<b>Vazão equivalente à TR = 10 anos .....</b>	<b>105</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Vazão equivalente à TR = 10.000 anos .....</b>	<b>109</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>112</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>114</b>
	<b>APÊNDICE 1 – PROCESSO DE SOLICITAÇÃO DE DADOS PARA DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA.....</b>	<b>122</b>
	<b>APÊNDICE 2 – FICHA DE CAMPO DE LEITURAS POSTO FLUVIOMÉTRICO ENGENHO BENTO NO RIO SIRINHAÉM ...</b>	<b>124</b>
	<b>APÊNDICE 3 – FICHA DE CAMPO DE LEITURAS POSTO FLUVIOMÉTRICO JOSÉ MARIANO NO RIO AMARAGI .....</b>	<b>125</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As barragens são sistemas construtivos disseminados por todo o mundo, muitas vezes edificadas com perspectivas que vão além de ganhos financeiros, como por exemplo, aquelas com propósitos de garantir o abastecimento de comunidades onde o acesso à água com qualidade é dificultoso.

Uma preocupação crescente sobre a possibilidade de falhas e eventuais rupturas destas estruturas emergiu com grande imponência. À medida que eventos críticos foram se desenrolando ao longo dos anos e, consigo, implicando em consequências inestimáveis para o ser humano e o meio ambiente, novos questionamentos regulatórios e sobre padronização de procedimentos de segurança também foram levantados.

As legislações sobre segurança de barragens são tratativas, relativamente recentes em diversos países e o conteúdo destas divergem de uma comunidade para outra, apontando-se elementos ímpares em cada uma e que se complementam.

Assim, faz-se de suma importância a expansão de pesquisas e descobertas acerca de metodologias relacionadas à gestão de segurança de barramentos. Porque, desta forma, facilita-se a correção de gargalos e práticas ineficientes existentes neste setor.

A identificação de cenários emergenciais decorrentes de rupturas ou defluências de barragens, por meio da manipulação de softwares e ferramentas computacionais, têm se tornado um recurso estratégico e bastante difundido atualmente, não tão somente com vistas ao desenvolvimento de pesquisas de cunho acadêmico, como principalmente no meio profissional.

Os mapas de inundações hipotéticas devem ser gerados a partir de modelagens hidrodinâmicas bem calibradas e com dados de entrada que sejam apropriados e mais coerentes com a situação real no local do empreendimento. Assim, necessita-se de uma busca constante no aprimoramento de técnicas para sua correta estimativa e, conseqüentemente, na melhoria da gestão de uma emergência e da mobilização da população localizada a jusante.

Neste contexto, no presente estudo, inicialmente fez-se um breve comparativo entre a legislação brasileira e alguns normativos internacionais sobre segurança de barragens, observando-se a existência de diferentes aspectos abordados entre eles e, na sequência, analisou-se a influência da cobertura do solo das áreas de preservação permanente a jusante da barragem da PCH Pedra Furada sobre características de manchas de inundação, a fim de contribuir com análises que irão permitir o melhoramento das atividades de contingência sobre a população residente em áreas suscetíveis a inundações.

## **2 OBJETIVOS**

Realizar um breve comparativo entre a legislação brasileira e alguns normativos internacionais sobre segurança de barragens, nomeadamente: Estados Unidos, China, África do Sul e Portugal.

Analisar a influência da cobertura do solo das áreas de preservação permanente (APPs) a jusante da barragem da PCH Pedra Furada, localizada no município de Ribeirão no estado de Pernambuco, sobre os tempos de chegada de onda e profundidades de água referentes a vazões hipotéticas para tempos de retorno de 10 e 10.000 anos, defluentes deste empreendimento.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 BARRAGENS

As barragens podem ser definidas como obstáculos artificiais edificados com a capacidade de reter água, ou qualquer outro líquido, rejeitos e detritos para fins de armazenamento ou controle (COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS- CBDB, 2013).

Diante da possibilidade de usos múltiplos destas estruturas, da existência vasta de corpos hídricos pelo planeta e do grande potencial de rendimento econômico destes sistemas construtivos, elas são executadas em alta escala a nível mundial, utilizando-se diferentes materiais de construção como terra, rocha, concreto e combinações destes.

A Agência Nacional de Águas (ANA) é o órgão brasileiro que gere e regulamenta o uso de recursos hídricos no país, assumindo a responsabilidade de manter um cadastro atualizado de barragens existentes em cursos d'água sob sua jurisdição e fiscalizar a segurança destes empreendimentos.

Segundo o último relatório de segurança de barragens emitido pela instituição, somam-se, no Brasil, 24.092 barragens cadastradas, cuja distribuição por categoria de uso é apresentada no Quadro 1 (ANA, 2018).

**Quadro 1** – Distribuição das barragens no Brasil de acordo com o seu uso

Uso	Barragens	Percentual
Aquicultura	2702	11,22
Irrigação	9827	40,79
Industrial	846	3,51
Regularização Vazões	753	3,13
Hidrelétrica	890	3,69
Outros	548	2,27
Dessedentação	4245	17,62
Sem Informação	719	2,98
Contenção de Rejeitos Minerais	790	3,28
Abastecimento de Água	1803	7,48
Recreação	914	3,79
Contenção de Resíduos Industriais	55	0,23
Total	24.092	100

Fonte: Agência Nacional de Águas- ANA (2018). Organizado pelo autor.

Quanto ao Registro Mundial de Barragens (COMISSÃO INTERNACIONAL DE GRANDES BARRAGENS- ICOLD, 2018), o cadastro considera somente as barragens classificadas como de grande porte, somando-se 59.071 barragens já construídas, com as principais finalidades de irrigação e geração de energia elétrica. A Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD) adota como “grande porte”, barragens com alturas iguais ou superiores a 15 metros, ou ainda, com alturas entre 5 e 10 metros acumulando mais de 3 milhões de metros cúbicos de água, rejeitos ou resíduos (ICOLD, 2018).

Do montante apresentado pela ICOLD, os países que lideram o ranking de maior quantidade de barragens de grande porte construídas em seus territórios são China, Estados Unidos e Índia. O Brasil aparece em quinto lugar nesta lista.

Frente à magnitude que estas construções podem atingir, a possibilidade de ruptura de barragens e o dano potencial de acidentes decorrentes de falhas nestes sistemas sempre foram motivos de preocupação e cautela, mas agravou-se ainda mais nos últimos anos, decorrente do erguimento desenfreado de barramentos e a ocorrência de alguns acidentes expressivos.

Além disto, as novas barragens têm atraído maiores preocupações em relação às barragens mais antigas, uma vez que os empreendimentos mais recentes têm sido implantados em áreas mais densamente povoadas e industrializadas (WANG, 2018).

Em novembro de 2015, o rompimento da barragem “Fundão”, construída para fins de acúmulo de rejeitos de mineração, localizada no Brasil no município de Mariana, estado de Minas Gerais, provocou a defluência de, aproximadamente, 55 milhões de metros cúbicos de lama, impactando áreas adjacentes aos corpos hídricos localizados a jusante do barramento por uma extensão de 650 km até encontrar a foz do rio Doce (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS- ANA, 2016a).

Em menos de três anos após este ocorrido, em janeiro de 2019, ainda em território brasileiro, a barragem de contenção de rejeitos “Barragem I” da Mina Feijão, no município de Brumadinho, estado de Minas Gerais, sofreu um colapso,

provocando a defluência de, aproximadamente, 12 milhões de metros cúbicos de líquido a jusante (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO- ANM, 2019).

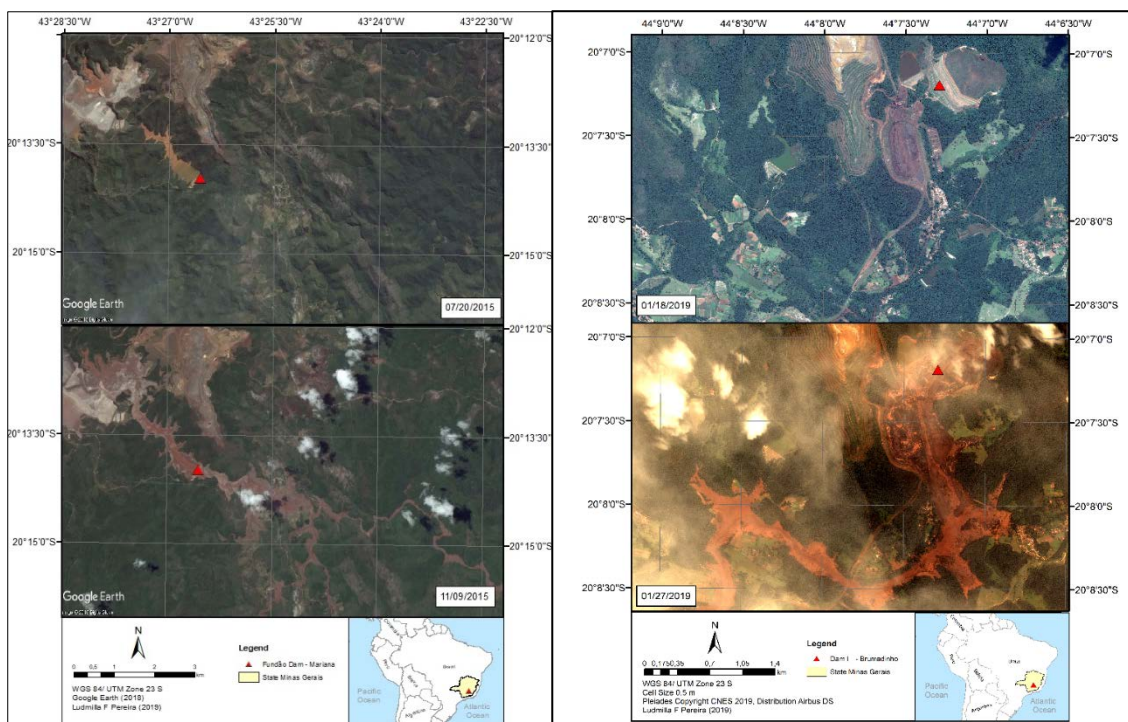
Embora o volume liberado pela segunda barragem supracitada seja cerca de quatro vezes menor que aquele liberado pelo primeiro desastre, o fato ocorrido em Brumadinho provocou um impacto direto sobre 419 pessoas, das quais foram confirmados 246 óbitos e 24 casos de desaparecimento (MINAS GERAIS, 2019).

Esta catástrofe, então, representou o estopim, pelo menos para o território brasileiro, para reaquecer o cenário de segurança de barragens e promover discussões sobre potenciais melhorias de práticas neste setor.

Inclusive, o Projeto de Lei do Senado Brasileiro nº 224, arquivado, criado em 2016 após o rompimento da barragem Fundão, que previa alterar e enrijecer a Política Nacional de Segurança de Barragens, foi colocado em pauta novamente em março de 2019 (BRASIL, 2019a). Além disto, segundo o Ministério do Desenvolvimento Regional, são previstas até o fim de 2019 a execução de vistorias em 3.386 barragens brasileiras classificadas como de maiores riscos (BRASIL, 2019b).

Na Figura 1, a seguir, ilustra-se, por meio de imagens de satélite, os rastros de rejeitos provocados pelos acontecimentos que se desenrolaram no Brasil, em Mariana e Brumadinho, respectivamente.

**Figura 1** – Rastro de lama nas proximidades da barragem de Fundão e da Mina Feijão decorrentes de seus rompimentos



Fonte: Própria autora.

Pode-se utilizar como outro exemplo de acidente relevante, a barragem de Oroville, localizada no rio Feather, no estado da Califórnia, considerada a mais alta dos Estados Unidos com 235 m de altura, que levou à evacuação das populações ribeirinhas situadas a jusante (cerca de 180 mil pessoas) e instaurou estado de emergência na cidade de Oroville em fevereiro de 2017, frente ao surgimento de uma erosão de alta magnitude localizada no rápido concretado de seu vertedouro principal.

Esta barragem, construída para fins de acúmulo de água e geração de energia elétrica, sucumbiu aos efeitos de chuvas intensas na região (Figura 2) o que levou o Departamento de Recursos Hídricos da Califórnia à decisão de liberar uma vazão com até 2.800 metros cúbicos por segundo, por meio de um desvio, para aliviar a pressão da água represada sobre o barramento e assim, reparar o dano no vertedouro (SABALOW; STANTON, 2017).



**Figura 2** – Erosão na estrutura de concreto do vertedouro da barragem de Oroville



Fonte: California Department of Water Resources (2017).

Ainda que os casos anteriores ilustrem barragens de diferentes tipos e dimensões, inversamente ao que ocorreu no Brasil, o acontecimento em Oroville não levou a consequências fatídicas, uma vez que a falha se desenvolveu lentamente, permitindo que os empreendedores e departamentos responsáveis pela obra pudessem controlar a anomalia e aplicar ações preditivas, emitindo o alerta de evacuação da população com antecedência (ações que não foram colocadas em prática nos rompimentos brasileiros).

A tomada de decisão e a rapidez com que este processo se desenvolve no momento de uma emergência, pode significar uma linha tênue entre a ocorrência de impactos mínimos e máximos provenientes de uma anomalia estrutural ou operativa de um barramento.

Por isso, faz-se necessário a existência de um planejamento da gestão e execução de procedimentos de manutenção ao longo da vida útil do barramento e previsão de ações de emergência, que visem garantir a integridade do meio ambiente nas áreas de influência das barragens, bem como resguardar o bem-estar e a vida da população situada a jusante.

Métodos comparativos e de ponderação entre políticas e práticas adotadas por diferentes entes auxiliam na otimização de quaisquer processos,

principalmente, na gestão de segurança de barragens, orientando, inclusive os países em desenvolvimento a elaborarem seus próprios programas de manutenção e monitoramento de riscos de barramentos (PISANIELLO, 2015).

Após a promulgação da Lei Federal brasileira n. 12.334 (BRASIL, 2010), a Agência Nacional de Águas (ANA) passou a utilizar e implementar novas metodologias e ferramentas destinadas a gerir o Sistema Nacional de Segurança de Barragens, tais como o Relatório de Segurança de Barragens.

Documento este que apresenta, com uma periodicidade praticamente anual, registros de acidentes e incidentes comunicados à ANA durante o período de abrangência deste relatório.

No Quadro 2 e na Figura 3, apresentados a seguir, estão contemplados todos os acidentes e incidentes já registrados formalmente pela instituição em seus Relatórios de Segurança de Barragens.

**Quadro 2 – Acidentes e incidentes registrados pela ANA entre 2010 e 2017**

Nome da Barragem	Caráter do Evento	Ano de Ocorrência	UF	Entidade Fiscalizadora	Causa Provável
PCH Pedra Furada	Acidente	2011	PE	ANEEL	Rompimento da Ombreira
PCH Dona Rita	Incidente	2012	MG	ANEEL	Cheia
PCH Cajuru	Incidente	2012	MG	ANEEL	Cheia
PCH Gafanhoto	Incidente	2012	MG	ANEEL	Cheia
PCH Mosquitão	Incidente	2012	GO	ANEEL	Desplacamento na adutora
PCH Piedade	Incidente	2012	MG	ANEEL	Rompimento da manta PEAD
Jaburu	Incidente	2012	CE	ANA	Deficiência de projeto
Barragem da CBE	Incidente	2012	Sem Informação	ANM	Deficiência de projeto
Aurizona	Incidente	2012	Sem Informação	ANM	Deficiência de projeto
Cupim	Incidente	2012	CE	SRH/CE	Deficiência de projeto
Capoeira	Incidente	2013	PB	ANA	Falta de manutenção
Três Irmãos	Incidente	2014	ES	AGERH	Cheia
Araçagi	Incidente	2014	PB	AESA/PB	Falha mecânica

(Continua)

<b>Nome da Barragem</b>	<b>Caráter do Evento</b>	<b>Ano de Ocorrência</b>	<b>UF</b>	<b>Entidade Fiscalizadora</b>	<b>Causa Provável</b>
<b>Barragem de Pesque-Pague</b>	Acidente	2014	MS	IMASUL/MS	Cheia
<b>Gramame</b>	Incidente	2014	PB	AESA/PB	Percolação
<b>UHE Jirau</b>	Incidente	2014	RO	ANEEL	Cheia
<b>Araçagi</b>	Incidente	2014	PB	AESA/PB	Obstrução do vertedouro
<b>Agropecuária Buritis</b>	Acidente	2014	MT	SEMA/MT	Sem Informação
<b>Fazenda Boa Vista do Uru</b>	Acidente	2014	GO	SEMARH/GO	Galgamento
<b>UHE Santo Antônio do Jari</b>	Acidente	2014	AP	ANEEL	Galgamento
<b>Vacaro</b>	Acidente	2014	SC	SDS	Galgamento
<b>Jacarecica I</b>	Incidente	2014	SE	SEMARH/SE	Sem Informação
<b>UHE Dona Francisca</b>	Incidente	2014	RS	ANEEL	Cheia
<b>B1 e B2</b>	Acidente	2014	MG	ANM	Erosão Interna
<b>Fundão</b>	Acidente	2015	MG	ANM	Liquefação de Afluentes
<b>Germano</b>	Incidente	2015	MG	ANM	Rompimento de barragem a montante
<b>Santarém</b>	Incidente	2015	MG	ANM	Rompimento de barragem a montante
<b>UHE Risoleta Neves</b>	Incidente	2015	MG	ANEEL	Rompimento de barragem a montante
<b>Córrego Seco</b>	Incidente	2015	ES	AGERH	Lixiviação
<b>UHE Cachoeira Caldeirão</b>	Acidente	2015	AP	ANEEL	Cheia
<b>PCH Inxu</b>	Acidente	2015	MT	ANEEL	Erosão Interna
<b>Coronel Sapucaia</b>	Incidente	2015	MS	IMASUL/MS	Dragagem do Reservatório
<b>Propriedade de Nei Zampieri</b>	Acidente	2015	SC	SDS	Erosão Interna
<b>Bacanga</b>	Acidente	2015	MA	SEMA	Desabamento da comporta
<b>Alto Grande</b>	Acidente	2016	BA	INEMA/BA	Cheia
<b>Fazenda Felícia</b>	Acidente	2016	GO	SEMAD/GO	Sem Informação
<b>Fazenda Guavirova</b>	Acidente	2016	PR	Agua Parana/PR	Cheia
<b>Jucazinho</b>	Incidente	2016	PE	APAC/PE	Fissuras

(Continua)

<b>Nome da Barragem</b>	<b>Caráter do Evento</b>	<b>Ano de Ocorrência</b>	<b>UF</b>	<b>Entidade Fiscalizadora</b>	<b>Causa Provável</b>
<b>Dique B3</b>	Incidente	2016	MG	ANM	Sem Informação
<b>Itabiruçu</b>	Incidente	2016	MG	ANM	Sem Informação
<b>Canoas</b>	Incidente	2016	AL	SEMARH/AL	Falta de manutenção
<b>Bosque IV</b>	Incidente	2016	AL	SEMARH/AL	Insuficiência do Vertedor
<b>Taboca</b>	Incidente	2016	TO	NATURANTINS/TO	Carreamento de material
<b>São Francisco</b>	Incidente	2016	AL	SEMARH/AL	Insuficiência do Vertedor
<b>Prado</b>	Incidente	2016	AL	SEMARH/AL	Insuficiência do Vertedor
<b>Gulandim</b>	Incidente	2016	AL	SEMARH/AL	Insuficiência do Vertedor
<b>Piauí</b>	Incidente	2016	AL	SEMARH/AL	Insuficiência do Vertedor
<b>Botuporá</b>	Incidente	2016	BA	INEMA/BA	Cheia
<b>Rincão dos Kroeff</b>	Acidente	2017	RS	SEMA/RS	Cheia
<b>Cacimba Nova</b>	Acidente	2017	PE	ANA	Percolação pela fundação
<b>Barreiros</b>	Acidente	2017	PE	ANA	Percolação pela fundação
<b>Lageado</b>	Acidente	2017	MS	IMASUL/MS	Galgamento
<b>Açude dos Irmãos</b>	Incidente	2017	PB	AESA/PB	Vertedor insuficiente quase causou galgamento
<b>PCH Tamboril</b>	Incidente	2017	GO	ANEEL	Rompimento parcial da membrana PEAD e aterro na margem esquerda
<b>Conjunto de Baias VIGA</b>	Incidente	2017	MG	ANM	Recalque após remoção de rejeitos
<b>Conjunto de Baias VIGA</b>	Incidente	2017	MG	ANM	Recalque após remoção de rejeitos
<b>Pindoba</b>	Incidente	2017	AL	SEMARH/AL	Vertedor insuficiente quase causou galgamento
<b>Casa de Pedra</b>	Incidente	2017	MG	ANM	Surgências após elevação do nível da água do reservatório alteado
<b>PCH Rodulf</b>	Incidente	2017	SC	ANEEL	Pequeno rompimento em junta de dilatação
<b>PCH Verde 4A</b>	Incidente	2017	MS	ANEEL	Vazamento dentro da casa de força

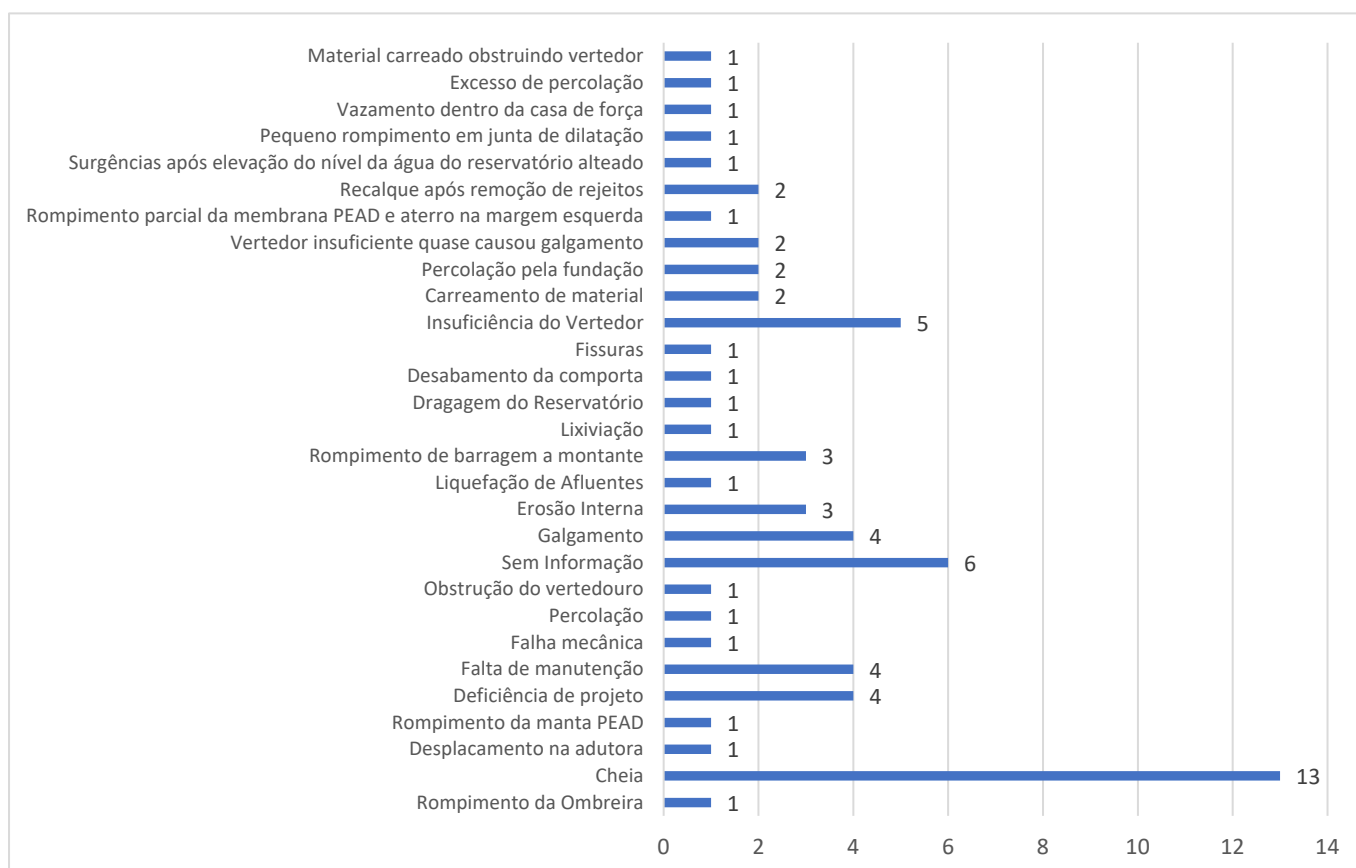
(Continua)

(Conclusão)

Nome da Barragem	Caráter do Evento	Ano de Ocorrência	UF	Entidade Fiscalizadora	Causa Provável
Capané	Incidente	2017	RS	SEMA/RS	Excesso de percolação
Água Limpa	Incidente	2017	ES	AGERH/ES	Material carregado obstruindo vertedor
Balneário Ayrton Senna	Acidente	Sem Informação	MS	IMASUL/MS	Cheia
Chá dos Pereira	Incidente	Sem Informação	PB	AESA/PB	Falta de manutenção
Saulo Maia	Incidente	Sem Informação	PB	AESA/PB	Falta de manutenção
Capa Zero	Incidente	Sem Informação	RO	SEDAM/RO	Carreamento de material
Duas Bocas	Incidente	Sem Informação	ES	AGERH	Sem Informação

Fonte: ANA (2010-2018). Organizado pela autora.

**Figura 3** – Quantificação de causas prováveis de acidentes e incidentes registrados pela ANA entre 2010 e 2017



Fonte: ANA (2010-2018). Organizado pela autora.

Nota-se que significativa parcela (35%) dos 67 registros formais de acidentes e incidentes em barragens deve-se a ocorrências de cheias,

galgamentos ou à ineficiência de órgãos de descarga. Este contexto, portanto, evidencia uma natureza de inexatidão no que tange aos projetos construtivos de barramentos ou, ainda, à fatores de segurança – exigidos pelas normas – pouco rígidos, uma vez que estas estruturas estão sucumbindo à eventos hidrológicos mais intensos.

Faz-se necessário, então, a reavaliação frequente de estudos de cheia de projeto e órgãos extravasores, face à eventuais erros humanos e de engenharia ou, ainda, às próprias modificações climatológicas e ambientais a que essas estruturas estão sujeitas ao longo da vida útil.

### 3.2 LEGISLAÇÃO SOBRE SEGURANÇA DE BARRAGENS

O levantamento dos principais aspectos abordados na legislação internacional sobre segurança de barragens auxilia na identificação dos elementos mais eficazes e que se constituem pontos de apoio ideais para aplicação dessas normativas.

As legislações analisadas foram escolhidas a partir da disponibilidade de dados ao acesso público, bem como pelos respectivos países estarem localizados em regiões diferentes e apresentarem características singulares relacionadas à segurança de barragens.

A China e os Estados Unidos contabilizam um significativo número de barragens de grande porte construídas em seus territórios, com 23.842 e 9.265 barramentos, respectivamente (ICOLD, 2018). Além disto, ambos países são considerados as maiores economias do mundo (INSTITUTO DE PESQUISA DE RELAÇÕES INTERNACIONAIS - IPRI, 2017), dando margem para investimentos grandiosos no setor de infra-estrutura.

Em Portugal, as barragens são estruturas de suma importância, primordialmente utilizadas para o abastecimento público e irrigação, sendo construídas principalmente nas regiões Sul e interioranas, cuja disponibilidade hídrica é irregular, tornando-se recursos escassos durante o verão. Já na região Norte, onde os recursos hídricos tem melhor distribuição, os barramentos são erguidos com propósitos de geração de energia hidrelétrica (AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE - APA, 2019).

A questão da segurança de barragens na África do Sul é um assunto abordado há mais de três décadas, desde o ano de 1987, quando entrou em vigor a legislação intitulada “Water Act of 1956”, que mais tarde, em 1998, veio a ser substituída por diretrizes específicas para este setor.

E frente à isto, as práticas adotadas pelo país são utilizadas como base e modelo para muitos outros, como o Brasil, por exemplo, quando da elaboração de materiais e guias orientativos para os proprietários de barragens, pela ANA (ANA, 2016b).

Cada um destes cinco países, incluindo-se o Brasil, possuem legislações específicas para construção, manutenção e operação de barragens, apresentando particularidades e focos diferentes, passíveis de análise e conhecimento, e que são brevemente apresentadas neste trabalho.

### **3.2.1 Brasil**

No Brasil, a Política Nacional de Segurança de Barragens é regida e estabelecida pela Lei Federal n. 12.334, de 20 de setembro de 2010 (BRASIL, 2010). Esta lei é aplicada a barragens destinadas ao acúmulo de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, contanto que suas estruturas atendam à, pelo menos, um dos seguintes requisitos:

- Altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15m (quinze metros);
- Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m<sup>3</sup> (três milhões de metros cúbicos);
- Reservatório que contenha resíduos perigosos;
- Categoria de dano potencial associado médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perdas de vidas humanas.

A política brasileira atual visa, primordialmente, regulamentar e garantir ações de segurança nas barragens em todo o território nacional, desde as fases de planejamento e projeto do barramento, durante o enchimento do reservatório e operação contínua.

Esta lei é viabilizada pela a existência de determinados instrumentos, sendo eles:

- A classificação de barragens por categoria de risco e dano potencial associado, regida pelos agentes fiscalizadores específicos para cada tipo de empreendimento;
- O Plano de Segurança de Barragens (PSB), que deverá ser revisado de maneira periódica estabelecida pelo órgão fiscalizador em função da classificação da barragem;
- O Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), para fins de armazenamento e disponibilização de dados;
- O Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente (Sinima);
- O Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Civil;
- O Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Utilizadoras de Recursos Ambientais; e
- O Relatório de Segurança de Barragens.

O Plano de Segurança de Barragens (PSB) se configura como uma importante ferramenta de registro e atualização de informações, compreendendo manuais de operação, projetos diversos, plano de ação de emergência, relatórios de monitoramento e inspeção regulares, cujo nível de detalhamento é estabelecido pelo órgão fiscalizador.

O Plano de Ação de Emergência que faz parte do PSB é um documento que integra ações a serem executadas em situação de emergência e os respectivos responsáveis, além de apresentar mapas que ilustrem inundações hipotéticas. Deve ser disponibilizado no empreendimento, nas prefeituras envolvidas, autoridades competentes e órgãos de defesa civil, reforçando a necessidade de alinhamento e mobilização de todas as partes em um cenário de urgência.



Dentro de um cenário emergencial, cabe destacar, que a legislação federal brasileira não decreta responsabilidades claras entre empreendedor e defesas civis quanto a atividades de alerta e resgate da população afetada em caso de defluências descontroláveis pelo empreendimento.

Analisando-se as legislações promulgadas pelos órgãos fiscalizadores federais, a Resolução n. 236 da ANA (2017) e a Portaria n.70.389 da ANM (2017) mencionam a responsabilidade do empreendedor em alertar a população residente dentro da área nomeada “Zona de Auto Salvamento”.

Ainda segundo ambas as resoluções, a Zona de Auto Salvamento compreende a região do vale a jusante ao barramento, delimitada pela menor (no caso da ANA) ou maior (no caso da ANM) das seguintes distâncias: a que corresponda a um tempo de chegada da onda de inundação igual a trinta minutos ou 10 km.

A Lei Federal aponta que as inspeções regulares de segurança e análise de dados de auscultação são função da categoria de risco e dano potencial associado à barragem, cujo conteúdo e periodicidade podem variar, mas que, impreterivelmente, devem ser realizadas nas fases de construção, operação e desativação do barramento.

Ressalta-se, ainda, que a categorização das barragens por risco, se baseia em características técnicas, estado de conservação da barragem e existência do Plano de Segurança da Barragem. Enquanto, a classificação quanto ao dano potencial associado é hierarquizada conforme a existência de população, infraestruturas e áreas protegidas a jusante, além da natureza do material represado e o respectivo volume (BRASIL, 2010).

A política federal ainda incumbe, à instituição reguladora nacional, a realização de programas educativos e de comunicação sobre segurança de barragens, com o propósito de conscientizar a sociedade, promover ações em instituições de ensino, pesquisas e associações relacionadas à engenharia de barragens.

Instituições como a ANA (Agência Nacional de Águas), ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), ANM (Agência Nacional de Mineração), CNRH (Conselho Nacional de Recursos Hídricos), entre outros órgãos fiscalizadores, trabalham em conjunto e desenvolvem diretrizes e resoluções de maneira paralela para os empreendimentos a eles outorgados.

Ressalta-se que, previamente à legislação apresentada, o Brasil tão somente dispunha de leis direcionadas ao gerenciamento de recursos hídricos como um todo, Lei Federal n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997 (BRASIL, 1997) e à criação da Agência Nacional de Águas, Lei Federal n. 9.984, de 17 de julho de 2000 (BRASIL, 2000).

### **3.2.2 Estados Unidos**

Nos Estados Unidos, os programas de segurança de barragens são regidos por legislações e instituições submetidas à Agência Federal de Gestão de Emergências (FEMA – *Federal Emergency Management Agency*), criada em 1979 com o propósito de auxiliar o governo federal na coordenação de atividades de prevenção, mitigação e recuperação em situações de desastres.

Entre os principais órgãos responsáveis pela segurança de barragens localizadas no país, e parceiros da FEMA, estão o Conselho de Revisão de Segurança de Barragens (*Review Board*) e o Comitê de Interagências sobre Segurança de Barragens (ICODS – *Interagency Committee on Dam Safety*). Este último, instituído e criado pelo Ato de Recursos Hídricos aprovado em 1996.

No território norte-americano, os estados atuam de maneira independente na composição das leis sobre segurança de barragens, desde que estas sejam revisadas e aprovadas, periodicamente, pela FEMA, podendo ser revogada as suas aplicações (MENESCAL, 2009).

Cita-se, então, como importante figura no cenário de segurança destas estruturas, a Associação dos Estados Oficiais de Seguranças de Barragens (ASDSO - *Association of State Dam Safety Officials*). Trata-se de uma organização sem fins lucrativos que apoia e incentiva os programas de segurança de barragens elaborados pelos estados, além de conscientizar a população acerca dos riscos inerentes à estas construções e a importância das

legislações e ações de prevenção (ASSOCIATION OF STATE DAM SAFETY OFFICIALS- ASDSO, 2017).

Em linhas gerais, o governo federal, personificado pela FEMA, adota diretrizes e instrumentos dispostos no Programa Nacional de Segurança de Barragens (NDSP – *National Dam Safety Program*) para reger e promover o desenvolvimento das atividades em barragens outorgadas a agências federais, e busca, por meio dele, influenciar os planos estaduais e privatizados de segurança, propondo parcerias, disponibilizando recursos financeiros, treinamentos e pesquisas.

Os instrumentos e orientações de aplicação do NDSP elaborados pelo ICODS, aprovados e adotados pela FEMA são os seguintes:

- FEMA P-1025: diretrizes federais para gerenciamento de risco de segurança de barragens;
- FEMA 64: plano de ação de emergência para empreendedores;
- FEMA P-946: mapeamento de inundações de riscos de enchentes associados com acidentes e rompimento de barragens;
- FEMA P-94: seleção e adequação de design de propagação de ondas;
- FEMA 65: análises de terremotos e design de barragens;
- FEMA 93: diretrizes federais para seguranças de barragens;
- FEMA 148: glossário de termos;
- FEMA 333: sistema de classificação de barragens de risco potencial.

Das diretrizes federais para segurança de barragens, FEMA 93 (INTERAGENCY COMMITTEE ON DAM SAFETY- ICODS, 2004), tem-se que as barragens, para fins diversos de uso, para as quais esta legislação seja aplicável, devem preencher pelo menos um dos seguintes requisitos:

- Altura, considerada desde o leito natural do curso hídrico a jusante ou desde o ponto mais baixo do maciço até o nível

máximo do volume represado, igual ou superior a 25 pés (7,62 m);

- Capacidade de armazenamento volumétrico igual ou superior a 50 acre-pés (61.674 m<sup>3</sup>);
- Risco a jusante potencialmente significativa, independente das dimensões.

As barragens que não excederem 6 pés (1,83 m) de altura, independente da capacidade volumétrica, ou que não excedam a capacidade volumétrica de 15 acre-pés (18.502 m<sup>3</sup>), independente da altura, estão dispensadas da aplicação destas diretrizes.

A FEMA 93 (ICODS, 2004) é aplicável de maneira equivalente para todas as barragens que atendem aos requisitos elencados acima, independentemente se os reservatórios são permanentes ou temporários, ou ainda, se acumulam água, rejeitos ou outros materiais.

Há resoluções regulatórias paralelas ao NDSP criadas por órgãos que fiscalizam especificamente as barragens do setor de mineração e elétrico, durante todas as fases da vida útil do empreendimento, mas que não os excluem da aplicação das leis estaduais.

Em suma, o conteúdo básico das regulamentações estaduais cria a figura de órgãos fiscalizadores próprios, desenvolvem uma metodologia de classificação de barragens para gradação das atividades de acompanhamento e apontam a responsabilidade primária sobre as barragens para o proprietário, ou seja, o dono do barramento é responsável pelas inspeções e monitoramento de operação (MENESCAL, 2009).

### **3.2.3 China**

As barragens na China são, à princípio, divididas em dois tipos, segundo suas finalidades: uso de recursos hídricos, sob jurisdição do Ministério de Recursos Hídricos (MRH), e geração de energia elétrica, sob responsabilidade da Empresa Estatal de Energia (EEE).

A responsabilidade primária pela segurança de barragem é do proprietário da mesma, onde o governo tem uma função supervisora e orientativa (MENESCAL, 2009; BRADLOW *et al.*, 2002).

Neste país, a autoridade reguladora tem o poder de monitorar inspeções realizadas pelo dono da barragem e aceitar ou rejeitar os relatórios emitidos, bem como têm o poder de conduzir suas próprias inspeções (BRADLOW *et al.*, 2002).

Em 1985, a Empresa Estatal de Energia criou o Centro de Supervisão de Segurança de Grandes Barragens (CSSGB). Em resposta, o Ministério de Recursos Hídricos criou o Centro de Monitoramento de Segurança de Barragens (CMSB), que mais tarde, em 1995, veio a ser conhecido como Centro de Gerenciamento de Segurança de Barragens (CGSB).

O CSSGB conduziu uma rodada de inspeções nas barragens sob jurisdição da EEE, em 1987, que perdurou por 12 anos, e vistoriou 96 empreendimentos, sendo a maioria construída após 1980 (INTERNATIONAL WATER POWER, 1999). Este procedimento colaborou para o aprimoramento dos profissionais envolvidos com segurança de barragens e reafirmou a conscientização deles para com a importância da realização de inspeções periódicas.

Algumas medidas corretivas como execução de alteamentos, tratamentos de trincas e fissuras nas estruturas, reparo de infiltrações e instalação de instrumentos de monitoramento, foram implementadas nos barramentos, compondo os princípios do Programa de Modificação de Monitoramento de Segurança de Barragem das Estações Hidrelétricas, publicado em 1992 pelo órgão correspondente.

Desde meados de 1950, o país desenvolvia e fabricava instrumentos de monitoramento de barragens, que foram incorporando atualizações tecnológicas com o passar do tempo e ficando cada vez mais precisos e automatizados.

Aliando esta produção de equipamentos ao grande número de barragens que começaram a ser construídas em 1980 e a implementação de

inspeções periódicas nas barragens, a partir de 1990, a China passou a se tornar um país de comportamento exemplar em termos qualitativos de monitoramento de barragem.

Em 1999, o CSSGB e o CGSB passaram a cumprir seus serviços em prol de duas entidades: a Comissão Estadual de Economia e Comércio e a Corporação de Energia do Estado da China. As atividades incluem advertir o governo sobre a gestão da segurança das barragens das centrais hidrelétricas, implementar políticas e diretrizes nacionais, supervisionar e orientar trabalhos de gerenciamento e encorajar os proprietários das barragens a promover uma cultura de monitoramento e segurança.

Atualmente, a segurança de barragens na China é analisada quanto à integridade das estruturas, monitoramento dos instrumentos, operação e planejamento de emergência (CHENG *et al.*, 2010) e é regida pelas legislações apresentadas no Quadro 3, apresentado a seguir.

**Quadro 3 – Normativos sobre segurança de barragens na China**

<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>Departamento</b>	<b>Data de Implantação</b>
DL/T 1134-2009	Unidade de aquisição automática de dados do monitoramento de segurança de barragem	Administração Nacional de Energia	01-12-2009
DL/T 1321-2014	Padrões para estrutura e identificação do banco de dados de monitoramento de segurança de barragens	Administração Nacional de Energia	01-08-2014
DL/T 1558-2016	Código para operação e manutenção do sistema de monitoramento de segurança de barragens	Administração Nacional de Energia	01-06-2016
DL/T 1735-2017	Tecnologia básica de cabos de instrumentação de monitoramento de segurança de barragens	Administração Nacional de Energia	01-03-2018
DL/T 1754-2017	Especificação técnica para sistema de informações de gerenciamento de segurança de barragens para usina hidrelétrica em operação	Administração Nacional de Energia	01-03-2018
DL/T 1901-2018	Guia para planos de preparação para emergências para grandes barragens de usinas hidrelétricas em operação	Administração Nacional de Energia	01-05-2019

(Continua)

(Conclusão)

<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>Departamento</b>	<b>Data de Implantação</b>
DL/T 324-2010	Protocolo de comunicação para sistema de automação de monitoramento de segurança de barragens	Administração Nacional de Energia	01-05-2011
DL/T 5211-2005	Especificação técnica para automação de monitoramento de segurança de barragens	Comissão Nacional de Desenvolvimento e Reforma	01-06-2005
DL/T 5313-2014(E)*	Guia para Avaliação de Segurança de Grandes Barragens de Usinas Hidrelétricas em Operação	Administração Nacional de Energia	01-08-2014
DL/T 5385-2007	Especificação para supervisão de construção do sistema de monitoramento de segurança de barragens	Comissão Nacional de Desenvolvimento e Reforma	01-12-2007
GB/T 22385-2008	Especificação para aceitação do sistema de monitoramento de segurança de barragens	Supervisão Nacional de Qualidade, Departamento de Inspeção e Quarentena, e Administração Nacional de Normalização	01-08-2009
SL 258-2017	Diretrizes para Avaliação de Segurança de Barragens	Ministério de Recursos Hídricos	09-04-2017
SL 268-2001	Especificação fundamental de equipamentos de sistema de automação para monitoramento de segurança de barragens	-	01-12-2001
SL 530-2012	Especificação para verificação e teste de instrumentos de monitoramento de segurança de barragens	Ministério de Recursos Hídricos	16-08-2012
SL 531-2012	Norma para instalação de instrumentos de monitoramento de segurança de barragens	Ministério de Recursos Hídricos	08-09-2012
SL 621-2013	Norma para desmantelamento de instrumento de monitoramento de segurança de barragem	-	29-11-2013
SL/Z 720-2015	Diretrizes para o plano de preparação para emergências do gerenciamento de segurança de barragens de reservatórios	Ministério de Recursos Hídricos	22-12-2015
SL 766-2018	Especificação técnica para identificação do sistema de monitoramento de segurança de barragens	Ministério de Recursos Hídricos	2019-03-05
* DL/T 5313-2014(E) significa que há duas versões, incluindo em Chinês e Inglês. A versão chinesa é nomeada DL/T 5313-2014, e a versão em inglês é nomeada DL/T 5313-2014(E).			

Fonte: China Standards on Review Engagements – CSRES (2019).

A legislação vigente e aplicável à avaliação de segurança de barragens (SL 258-2017) é uma atualização do documento “Diretrizes para Avaliação de Segurança de Barragens”, publicado inicialmente em 2000.

As “Diretrizes para Avaliação de Segurança de Barragens” (CHINA, 2017) são aplicáveis para barragens com altura de, no mínimo, 15 metros ou que representem um volume maior ou igual a um milhão de metros cúbicos.

Baseado nesta mesma legislação, a avaliação de características técnicas como capacidade de controle de cheias, percolação, segurança estrutural, sismicidade e segurança de estruturas metálicas é dividida em três níveis: A, B, e C. Classe A é seguro e confiável; Classe B é segurança mínima, mas incompleta; Classe C é inseguro.

As conclusões da avaliação da qualidade de engenharia são divididas em “qualificadas”, “qualificadas básicas” e “não qualificadas”; as conclusões da avaliação da gestão operacional são divididas em “normativo”, “normativo comparativo” e “não padrão”, como base de referência para avaliação abrangente da segurança de barragens.

Segundo Cheng *et al.* (2010), o monitoramento do barramento por meio de inspeções é realizado de três formas: atividades diárias, anuais e especiais. O primeiro tipo é incluído na rotina de operação do barramento, acompanhamento sistematicamente as ocorrências observadas. As inspeções anuais são feitas pela equipe técnica antes e depois das épocas chuvosas e, também, no fim de todo ano. As inspeções especiais são realizadas quando são percebidos sinais de danos com potencial para prejudicar a segurança da operação.

Quanto à previsão e medidas de emergência, estas são regidas pelas Diretrizes para o Plano de Preparação para Emergências da Gestão de Segurança de Barragens de Reservatórios (SL/Z 720-2015) que auxiliam no planejamento de respostas e sistemas de alerta. Esta norma é aplicável à preparação de reservatórios de grande e médio porte, e podem ser implementados, como referência, para pequenos reservatórios.



A preparação do plano deve ser organizada pela unidade de gestão do reservatório ou seu departamento competente, o proprietário do reservatório (proprietário), e deve executar os procedimentos correspondentes de aprovação e arquivamento.

Na China, há uma especificação técnica intitulada “SL 164-2010” sobre testes de modelos e simulações numéricas de várias barragens, modelagem de inundação e simulações numéricas de bobinas e diques, e pode ser usada como referência para simulações de explosões de engenharia similares.

Os planos de emergência devem ser desenvolvidos para todos os tipos de barragens, mas de acordo com o Guia de Mapeamento de Cheias (1997) apenas para grandes e médios reservatórios, um mapeamento das áreas de risco de inundação deve ser desenvolvido (CHENG *et al.*, 2010).

#### **3.2.4 Portugal**

Na política de segurança de barragens de Portugal, figuram como entidades de apoio e fiscalização às atividades, a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), a Autoridade Nacional de Proteção e Defesa Civil (ANPC) e a Comissão de Segurança de Barragens (CSB).

Atualmente, em Portugal, a legislação aplicável referente à segurança de barragens foi determinada pelo decreto-lei n. 21, de 28 de março de 2018, que estabelece dois instrumentos de atuação: o Regulamento de Segurança de Barragens (RSB) e o Regulamento de Pequenas Barragens (RPB).

Inicialmente, o RSB foi publicado pelo decreto-lei n.11, de 6 de janeiro de 1990, e posteriormente revisado pelo decreto-lei n. 344, de 15 de outubro de 2007, estabelecendo algumas diretrizes para atividades de segurança em barragens maiores. O RPB também já era um instrumento existente, desde a promulgação do decreto-lei n. 409, de 14 de dezembro de 1993.

Com a última atualização em 2018, houve uma revisão da repartição de competências no que diz respeito à dimensão destes empreendimentos, de tal

maneira que se pudesse enquadrar em algum destes regulamentos praticamente todas as barragens já construídas no país.

Desta forma, de acordo com esta alteração, o RSB é aplicado às barragens entendidas como de grande porte, com altura igual ou superior a 15 m, ou com altura igual ou superior a 10 m que condicionem a existência de um reservatório com volume superior a 1 hm<sup>3</sup>.

Já o RPB, é aplicado às barragens não enquadradas no regulamento supracitado, que compreendam estruturas com altura inferior a 10 m ou que tenham altura igual ou superior a 10 m e inferior a 15 m cujo reservatório tenha capacidade volumétrica inferior a 1 hm<sup>3</sup>. Excetuam-se deste regulamento, as barragens que possuem altura inferior a 2 m, medida desde a cota do talvegue até a cota do coroamento.

Assim como a legislação brasileira, o decreto-lei n. 21/2018 de Portugal incorpora a gradação das medidas de registro e controle de segurança de barragens conforme o dano potencial associado a estrutura analisada. As barragens construídas em território lusitano podem ser classificadas em três classes distintas (classe I, II e III) a depender das características técnicas do barramento e do dano potencial oferecido a vidas humanas, bens e meio-ambiente.

O Quadro 4, a seguir, apresenta os parâmetros adotados para a categorização das barragens em território Português. Entende-se que Y é o número de edificações fixas no vale a jusante e X, o risco da barragem caracterizado pela função  $X = H^2 \sqrt{V}$ , sendo H a altura da barragem, em metros, e V a capacidade do reservatório em hm<sup>3</sup>.

**Quadro 4 – Classificação das barragens portuguesas**

<b>Classes</b>	<b>Risco e danos potenciais</b>
I	$Y \geq 10$ e $X \geq 1000$
II	$Y \geq 10$ e $X < 1000$ Ou $0 < Y < 10$ , independente do valor de X Ou Existência de infraestruturas, instalações e bens ambientais importantes
III	$Y = 0$ , independente do valor de X

Fonte: Portugal (2018).

Com relação a situações emergenciais nas barragens, o RSB define a existência de dois planos de ação: interno e externo. O primeiro é elaborado pelo dono da obra, relativo a segurança do reservatório e da zona de auto salvamento (tempo de chegada de onda igual a 30 min, com no mínimo 5 km de distância). Enquanto, o segundo é de responsabilidade do sistema de proteção e defesa civil.

Para as barragens de classe I, do RSB, são exigidos ambos os planejamentos de emergência. Para as barragens classe II, são exigidos planejamentos simplificados de segurança.

No caso de pequenas barragens, abarcadas pelo RPB, em casos de emergências, é incumbido ao dono da obra avisar os residentes próximos da barragem, alertar a Autoridade e os Serviços de Proteção Civil.

Da mesma forma que apontam as resoluções brasileiras, em Portugal, no caso de uma emergência, o dono da obra é responsável por tão somente alertar a população na Zona de Auto Salvamento e os órgãos de defesa civil.

O RSB promulga a existência de um plano de observação que rege a execução de inspeções visuais e análise do comportamento das estruturas que compõem as barragens. As grandezas de monitoramento, metodologias aplicadas e frequência das atividades de observação são levantadas pelo próprio dono da obra, de acordo com as Normas de Observação e Inspeção de Barragens (Portaria 847/93) e sujeitas a aprovação da Autoridade Nacional de Segurança de Barragens.

Para as barragens de classe I sujeitas ao RSB, a Autoridade tem o direito de realizar inspeções, quando julgar oportuno, com vistas à verificação da conservação das estruturas e das condições de manutenção e operação dos órgãos extravasores.

O RPB, em contrapartida, estipula que, para as barragens sob sua jurisdição, o dono da obra deve providenciar a execução de inspeções visuais anuais antes do período chuvoso e após a ocorrência de circunstâncias excepcionais, enviando os respectivos relatórios à Autoridade.

Os planos de observação e emergência, além de estudos e análises complementares executados pelos proprietários das barragens, compõem um arquivo técnico atualizado e disponível à Autoridade.

### **3.2.5 África do Sul**

O histórico legal da África do Sul em segurança de barragens, remonta à promulgação do *National Water Act*, pela República Federal Sul Africana em 1998, que tem por objetivos a gestão de recursos hídricos no país e a preservação da qualidade das águas em prol de usos sustentáveis.

O capítulo 12 do Ato (AFRICA DO SUL, 1998), localmente conhecido por “The Act”, dispõe sobre as diretrizes que os proprietários de barragens no país devem utilizar e medidas a serem tomadas por eles, visando à manutenção de uma boa segurança com riscos de falhas mínimos em seus empreendimentos.

As barragens de interesse, sobre as quais este ato é aplicável, são chamadas de “barragens com risco de segurança”, cujos maciços ultrapassam a marca dos 5 metros de altura, bem como uma capacidade de armazenamento de líquidos superior a 50.000 m<sup>3</sup>.

À um barramento também pode ser atribuído este título, se o Ministro de Assuntos da Água e Florestas, julgar adequado, baseando-se na necessidade de proteção das pessoas, propriedades e qualidade dos recursos, características de projeto e impactos socioeconômicos.

O Ato também instrui os proprietários das barragens com risco de segurança a se reportarem ao Ministério do Meio Ambiente com informações, projetos, desenhos, entre outros documentos ou substituir esta atividade permitindo que uma pessoa autorizada pelo ministério possa inspecionar o barramento, afim de que seja confirmada a classificação da estrutura, verificar se o regulamento tem sido cumprido e ainda, averiguar a necessidade de execução de possíveis atividades de reparos e correção de ocorrências anômalas.

Em complemento a este Ato, em fevereiro de 2012, o governo sul africano publicou os Regulamentos de Segurança de Barragens (ÁFRICA DO

SUL, 2012), que são, atualmente, administrados e coordenados pela instituição doravante denominada Gabinete de Segurança de Barragens (DSO – *Dam Safety Office*).

Os Regulamentos propõem que as barragens com risco de segurança possam ser subdivididas em três grupos (Categorias I, II e III), a partir do cruzamento de informações sobre suas dimensões estruturais (classes pequena, média e grande) e o dano potencial associado (classes baixa, significativa e alta), objetivando-se graduar as medidas de controle e de segurança do maciço.

Em méritos dos projetos de engenharia para as barragens, sejam elas enquadradas em qualquer categoria, cita-se a necessidade de se elaborar um mapeamento de manchas de inundação decorrentes de uma potencial falha estrutural da obra analisada, bem como um mapeamento das enchentes provenientes do rompimento de barragens a montante, caso existir.

Uma avaliação e revisão da segurança das barragens de Categoria I, baseada em registros e dados técnicos, deve ser realizada em intervalos de tempo de cinco a dez anos e apresentadas, quando exigido pelo Diretor-Geral do Gabinete. Já para as Categorias II e III, o proprietário deve providenciar uma análise de segurança inicial da barragem, em um período de até três anos após o início da operação, e avaliações periódicas que não ultrapassem intervalos de cinco anos.

### **3.2.6 Análise da legislação internacional**

No Quadro 5, a seguir, é apresentado um resumo comparativo entre alguns pontos chaves, referente às legislações sobre segurança de barragens, descritas no item anterior.

## Quadro 5 – Resumo comparativo entre a legislação internacional sobre segurança de barragens

		BRASIL	ESTADOS UNIDOS	ÁFRICA DO SUL	PORTUGAL	CHINA
Requisitos mínimos para aplicação da legislação (Pelo menos uma característica)	Nome/Identificação	Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei n. 12.334/2010)	Diretrizes Federais para Segurança de Barragens (FEMA 93/2004)	Ato Nacional da Água (Act 36 of 1998) e Regulamento de Segurança de Barragens (2012)	Regulamento de Segurança de Barragens (RSB) e Regulamento de Pequenas Barragens (RPB) - Decreto-Lei n.21/2018	Diretrizes para Avaliação de Segurança de Barragens (SL258-2017)
	Altura mínima da barragem	15 metros	7,62 metros	5 metros	15 metros (RSB) and 2 metros (RPB)	15 metros
	Capacidade mínima da barragem	3.000.000 m <sup>3</sup>	61.674 m <sup>3</sup>	50.000 m <sup>3</sup>	RSB: altura mínima de 15 metros ou altura mínima de 10 metros com no mínimo 1hm <sup>3</sup> ; RPB: altura inferior a 10 metros ou altura entre 10 e 15 metros com volume inferior a 1 hm <sup>3</sup>	1 hm <sup>3</sup>
	Tipo de acumulação	Resíduos Perigosos	O tipo de acumulação não é pré-requisito.	O tipo de acumulação não é pré-requisito.	O tipo de acumulação não é pré-requisito.	O tipo de acumulação não é pré-requisito.
	Dano potencial associado	Existente	Existente	Existente	O dano potencial associativo não é pré-requisito.	O dano potencial associativo não é pré-requisito.
Responsabilidades	Responsável legal pela barragem	Empreendedor (quem detém os direitos de exploração)	Agência federal responsável pelo planejamento, projeto, construção, operação ou regulamentação de barragens	Proprietário (quem detém direitos de controle)	Proprietário da barragem.	Proprietário da barragem.
Classificação da barragem	Crítérios	Risco, Dano Potencial Associado e Volume	As barragens de propriedade das agências federais não são classificadas ou categorizadas	Dimensões estruturais (altura) e dano potencial associado	Risco (altura e volume) e dano potencial associado	Qualidade de projeto, operação, padrão de controle de manutenção e de inundação e infiltração, segurança estrutural, segurança sísmica e segurança estrutural.
	Responsável pela classificação	Feita pelo Empreendedor e Aprovada por Agentes fiscalizadores		Departamento de Assuntos da Água	Feita pelo proprietário e aprovada pela Autoridade (APA)	Feito pelo proprietário e supervisionado pela agência de inspeção
	Classes	Variável conforme resoluções do órgão fiscalizador: elétrico, mineração, usos múltiplos (Classes de A a E)		Classes I, II e III	Classes I, II e III	Classes A, B e C
Inspeções	Tipos de inspeção	Especial e Regular	Informal, Intermediária, Formal e Especial.	Regular e Formal	Antes do enchimento, depois do primeiro enchimento e inspeções visuais	Diariamente, anual e especial
	Periodicidade	Variável conforme resoluções e classificação do órgão fiscalizador. Especial: usualmente antes do 1º enchimento e/ou em caso de ocorrências excepcionais.	Informal: agendada pela equipe de especialistas. Intermediária: no mínimo bianual. Formal: no mínimo a cada 5 anos. Especial: imediatamente após um evento extremo (inundações, terremotos, falhas).	Regular: variável, mas, no mínimo, semanal. Formal: intervalos entre 5 e 10 anos (conforme classificação).	Antes do enchimento: antes, simultaneamente ou após o término da construção da barragem. Após o primeiro enchimento: antes do início da operação. Inspeções visuais: variáveis de acordo com o cronograma do plano de observação, quando a Autoridade considerar apropriado e após ocorrências excepcionais.	Diariamente: todos os dias. Anual: antes e depois da estação chuvosa e no final de cada ano. Especial: quando é percebido sinais de danos ou risco de emergência.
	Responsáveis técnicos pela execução	Equipe multidisciplinar especializada em segurança de barragens (contratada pelo Empreendedor).	Equipe treinada e qualificada de acordo como nível de inspeção exigido.	Equipe com experiência e qualificada indicada pelo Proprietário. Inspeções formais de Classes II e III são realizadas por um profissional certificado (APP).	Autoridade (APA)	Equipe técnica especializada contratada pelo proprietário ou agência de fiscalização.
Plano de Ação de Emergência	Obrigatório para quais barragens	Com dano potencial alto	Todas que atendam aos requisitos	Todas que atendam aos requisitos	Classes I e II	Reservatórios grandes e médios
	Quem tem acesso	Empreendimento, prefeituras e defesas civis envolvidas	Órgãos governamentais locais, estaduais e federais	Proprietário e defesa civil local	Empreendimento, defesa civil e Autoridade (APA)	Empreendimento e agência fiscalizadora

Fonte: Própria autora.

Do comparativo exposto, então, tem-se que, em linhas gerais, as legislações de segurança de barragens apresentadas se assemelham em dois pontos cruciais para gestão da operação: a existência de um sistema de classificação das barragens em níveis de priorização e a necessidade de elaboração de um plano para situações de emergências.

A subcategorização dos barramentos sujeitos às respectivas legislações destes países, permite a priorização daquelas obras que oferecem um maior risco de acidentes e que possivelmente causariam maiores danos nas áreas de influência, o que leva a fixação de níveis apropriados de monitoramento, inspeção e planos de segurança em geral.

Entretanto, questiona-se a manutenção e atenção dadas às barragens consideradas de pequeno porte. Ainda que o dano potencial à essas estruturas sejam menores, elas também apresentam riscos oferecidos por falhas de projeto, operativas, ou pelo decaimento natural de qualidade construtiva ao longo da sua vida útil.

Por meio do que foi exposto, infere-se que as legislações brasileira e chinesa, principalmente, são aquelas que menos apresentam rigidez com relação às características técnicas, em termos de altura do barramento e volume do reservatório, para aplicação das legislações federais.

Por ventura, nestes países, os barramentos de menor porte devessem ser avaliados com um rigor mais acentuado antes de serem construídos, frente à maior facilidade de serem erguidos, quando comparados com barragens de portes maiores.

Ou ainda, para os barramentos de menores dimensões, poderiam ser criados regulamentos específicos tal como foi feito por Portugal, ao alterar sua legislação principal adicionando o Regulamento para Pequenas Barragens. Desta forma, maximiza-se a aplicação de diretrizes de construção e manutenção de barramentos e, conseqüentemente, a segurança e controle de operação.

A África do Sul, juntamente com o território lusitano, apresentam as legislações federais mais rígidas, quando comparadas aos demais países, com

relação às características técnicas mínimas para sua aplicação, coagindo um maior número de empreendedores a cumprirem com as normas.

Quanto aos planos de emergência, exalta-se a possibilidade de aliar a simulação de manchas de inundação provenientes de rompimentos hipotéticos das barragens à um leque de possíveis ações e medidas mitigadoras a serem tomadas pelos proprietários, antes de resgate e populações atingidas.

Assim, destaca-se a importância de haver simulados e treinamentos envolvendo as pessoas potencialmente impactadas, para que no momento da emergência, o planejamento corra com êxito e minimize os danos.

A inserção de funções matemáticas e programas computacionais para o mapeamento das áreas sujeitas aos riscos impostos pelas barragens construídas é um avanço grandioso no aspecto de segurança destas estruturas. Mas, ainda não é possível detectar em todas as legislações e regulamentos elaborados, instruções que padronizem parâmetros ou meçam a viabilidade de aplicação de determinada metodologia. Deixa-se, assim, a cargo daqueles que elaboram os mapeamentos, a caracterização e quantificação das enchentes e das áreas que poderão ser atingidas.

Destaca-se a importância de se compor uma legislação capaz de aliar medidas estruturais e operativas a medidas não-estruturais que vão além da obra. Isto é, soma-se à determinação de exigências e pontos de correção ligados à engenharia e comportamento do barramento, a necessidade de se criar uma interface entre a segurança da construção em si e a do meio ambiente viabilizada por programas e planos educacionais que visem conscientizar a sociedade e as populações que residem na área de influência destas obras sobre estes empreendimentos.

O termo “Zona de Auto Salvamento” aparece nas resoluções das agências fiscais brasileiras e no decreto-lei português, definindo uma área de residentes a jusante dos barramentos em que se considera não haver tempo suficiente para que os entes de defesa civil possam realizar o resgate. Desta forma, em caso de situações emergenciais nas estruturas do empreendimento, esta região detém máxima prioridade.



O uso irregular de reservatórios e a ocupação indevida das áreas a jusante de uma barragem, que contribuem para o aumento do dano potencial associado à estrutura, podem ser minimizados por meio de atividades institucionais, organizadas por entes públicos ou privados, que alertem as pessoas e que levem conhecimento a elas, como é sugerido pela política nacional brasileira e lusitana, além da desapropriação das faixas marginais aos cursos hídricos.

A partir de uma visão mais generalizada do panorama jurídico-institucional de segurança de barragens nos países apresentados, percebe-se a participação ativa do Estado, não só por meio da criação das legislações e normativos, mas como também por meio da criação de departamentos e instituições destinados especificamente a acompanhar e monitorar estas obras durante todas as fases de sua vida útil.

Este processo contribui para a especialização dos órgãos em suas respectivas áreas de atuação, possibilitando um contato direto com o setor supervisionado e melhorando a qualidade da gestão da segurança.

No entanto, é importante mencionar que a equipe técnica dessas agências, bem como a agilidade na realização das avaliações são extremamente importantes para o licenciamento e aprovação dos relatórios de segurança emitidos pelos proprietários. Não basta serem criados órgãos fiscalizadores e a ideia platônica de monitoramento federal sobre os cumprimentos das legislações pelos empreendedores. É necessário que essas cláusulas se solidifiquem e que, de fato, haja essa fiscalização.

As barragens se tornaram empreendimentos de significativa contribuição construtiva e econômica para a sociedade. Mas, paralelamente a estes benefícios, esses empreendimentos sujeitam-se à adversidades e inconsistências provenientes de deficiências de projetos, construção, operação, manutenção e, inclusive, na tomada de decisões em situações emergenciais, que acabam por exigir um trabalho de gestão imperativo e minucioso.

Até mesmo a política norte-americana que se configura pela existência de legislações estaduais independentes fica sujeita à aprovação da agência

federal correspondente. Isto porque a condição de obrigatoriedade de cumprimento de determinados requisitos, leva os empreendedores a promoverem uma cultura de segurança em seus empreendimentos, além de uma melhor gerência dos riscos perante as populações ribeirinhas e ao meio ambiente, como um todo.

Aliado a este assunto, o histórico da criação de legislações relacionadas à segurança de barragens é um viés bem relevante de se caracterizar. Todas as publicações regulatórias aplicadas, atualmente, sobre os cinco países analisados, foram sancionadas há menos de 25 anos. Ou seja, este período, quando comparado à idade de determinadas construções, se configura como uma preocupação recente.

No caso do Brasil, inclusive, a Política Nacional de Segurança de Barragens foi implementada há, apenas, nove anos, o que implica, nos dias atuais, em uma dificuldade muito grande do empreendedor (ou concessionário do barramento), dos órgãos fiscalizadores e do governo federal a se adaptarem a possuir uma cultura e práticas de monitoramento de segurança constantes e regulares.

Essa dificuldade de adaptação foi refletida, principalmente, nos últimos rompimentos de barragens acontecidos neste país, que evidenciaram a necessidade de validação das práticas empregadas nos empreendimentos e da correspondente fiscalização pelos órgãos responsáveis.

Com relação às boas práticas, a China, ao instituir a execução de inspeções visuais diárias por parte dos empreendedores, se configura como o país, dentre os apresentados, com a melhor taxa de frequências de monitoramento. A África do Sul propõe uma regularidade semanal neste quesito.

Ambos países, portanto, tem o monitoramento como um dos pontos fortes de suas legislações, uma vez que essa periodicidade permite à equipe técnica avaliar e acompanhar o desenvolvimento ou a evolução de anomalias com maior rapidez e, conseqüentemente, encontrar soluções antes que elas ofereçam risco ao barramento.

### 3.3 ESTUDOS HIDROLÓGICOS

Os estudos hidrológicos são peças fundamentais para a segurança de barragens, acompanhando estas estruturas durante todas as fases de planejamento e projetos construtivos do empreendimento e, periodicamente, ao longo de toda a vida útil destas estruturas.

Essa constante abordagem hidrológica, pode ser entendida a partir da simples conceituação desta ciência, como proposto por Tucci (2001):

Área que estuda o comportamento físico da ocorrência e o aproveitamento da água na bacia hidrográfica, quantificando os recursos hídricos no tempo e no espaço e avaliando o impacto da modificação da bacia hidrográfica sobre o comportamento dos processos hidrológicos. A quantificação da disponibilidade hídrica serve de base para o projeto e planejamento dos recursos hídricos (TUCCI, 2001, p. 26).

Dessa forma, compreende-se que a hidrologia é uma abordagem intrínseca ao monitoramento regular não só das barragens e reservatórios de acúmulo de água, mas como também de qualquer obra de engenharia que sofra influência direta dos recursos hídricos.

Deve-se destacar, também, que a alteração do uso e ocupação das bacias hidrográficas ao longo do tempo, se traduz, hoje, em um condicionamento de primeira instância para diagnósticos geoambientais e consequente planejamento de medidas mitigadoras.

Uma significativa parcela dos acidentes e incidentes com barragens (Figura 3), no Brasil, decorre de falhas de segurança destas estruturas relacionadas a eventos hidrológicos. Ou seja, estas obras, na conjuntura atual do país, não foram projetadas adequadamente ou, ainda, não têm seus estudos básicos reavaliados com frequência.

O Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens (ANA, 2016c) estabelece que a cheia de projeto destes empreendimentos deve ser fixada a partir da aplicação de métodos estatísticos, fazendo-se uso de séries históricas, simulações hidrológicas e fórmulas empíricas, além de recomendar tempos de recorrência mínimos para dimensionamento de extravasores, tal como exposto no Quadro 6.

**Quadro 6** – Tempos de recorrência mínimos recomendados pela ANA para as cheias de projeto

Altura (m)	Volume (hm <sup>3</sup> )	Tempo de Recorrência (anos)
$H \geq 30$	$V \geq 50$	Cheia Máxima Provável*
$15 \leq H < 30$	$3 \leq V < 50$	1.000
$H < 15$	$V < 3$	500

\*Em alternativa, pode-se utilizar o valor correspondente à cheia com período de recorrência de 10.000 anos.  
H: altura máxima da barragem.

Fonte: ANA (2016c).

As “Diretrizes para projetos de PCH” elaboradas pela Eletrobras, em 2003, recomendam requisitos de projetos similares àqueles propostos pela ANA, entre eles:

- Para barragens com altura superior a 30 m ou cujo colapso envolva risco de perdas de vidas humanas, a vazão de projeto dos órgãos extravasores será a cheia máxima provável;
- Para barragens de altura inferior a 30 m ou com reservatório com volume menor que 50 hm<sup>3</sup> e, não havendo risco de perdas de vidas humanas, a cheia de projeto deverá respeitar a recorrência mínima de 1000 anos.

Para a aplicação da metodologia de cálculo de cheias de projeto adequada, em primeiro lugar, deve-se verificar a extensão da série histórica de dados fluviométricos existente e também, se necessário, o tamanho da área de drenagem da bacia em estudo (DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA- DAEE, 2005).

A Centrais Elétricas Brasileiras S.A.- Eletrobras (2003) ainda aponta que a caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica onde está inserido o empreendimento, auxilia na interpretação da hidrologia, na descrição do regime fluvial e sedimentológico do curso d’água principal, além de permitir estabelecer correlações com outras bacias hidrográficas.

Este último aspecto, inclusive, é de suma importância para procedimentos de regionalização de vazões e determinação de parâmetros

hidrológicos em locais onde o acesso ou a disponibilidade de dados são escassos.

No caso dos empreendimentos produtores de energia elétrica, pode-se inferir, ainda, que os estudos hidrológicos exercem influência direta na quantificação da geração e da potência hidroenergética instalada. E ao se adotar esta premissa como verdade, afirma-se que a hidrologia auxilia na otimização da relação custo/benefício do empreendimento, permitindo-se adotar condições construtivas ou tecnologias que melhor se adaptem aos regimes fluviais locais.

### 3.4 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Segundo Cestari Junior (2013), a propagação de ondas de cheias de barragens pode ser simulada por meio de modelos empíricos (obtidos por meio de regressão e/ou observação de eventos já ocorridos), modelos físicos e modelos matemáticos (analíticos ou numéricos que se baseiam na solução de equações diferenciais).

Para a simulação das cheias provenientes do rompimento hipotético de uma barragem e avaliação das suas consequências, têm sido utilizados, principalmente, os modelos matemáticos capazes de determinar a formação da brecha (abertura formada pela falha da barragem) e, na sequência, a propagação do hidrograma de cheia (COLLISCHONN; TUCCI, 1997).

Os modelos numéricos mais aplicados para a simulação do escoamento, a jusante de barragens, também chamados de modelos hidrodinâmicos, são baseados na solução das equações de Saint-Venant e Navier-Stokes e passíveis de serem abordados sob perspectivas unidimensionais e bidimensionais (BALLESTEROS *et al.*, 2011).

Embora os modelos hidrodinâmicos unidimensionais sejam ideais para obtenção dos perfis de água (LEITÃO, 2018) e necessitem de um menor tempo de processamento (COUTINHO, 2015), estas hipóteses se configuram como alternativas mais simplificadas, desconsiderando-se a criação de ondas de choque (CESTARI JUNIOR, 2013).

O processamento das simulações bidimensionais, segundo Coutinho (2015), se desenvolve da seguinte maneira:

Para a representação do escoamento na planície de inundação, esses modelos utilizam malhas computacionais com células regulares ou não regulares. Essa malha computacional possibilita simular a inundação se propagando no espaço bidimensional, ou seja, fluxos perpendiculares ao eixo do canal principal conforme a topografia representada através de um Modelo Digital de Elevação (COUTINHO, 2011, p. 22).

No que concerne à análise de efeitos a jusante, decorrentes de ruptura de barragens, a importância recai sob o processo de propagação da onda, principalmente sobre efeitos a nível de rugosidade do leito e do armazenamento de terrenos marginais, que levam à possível atenuação da intensidade da cheia (VISEU, 2006).

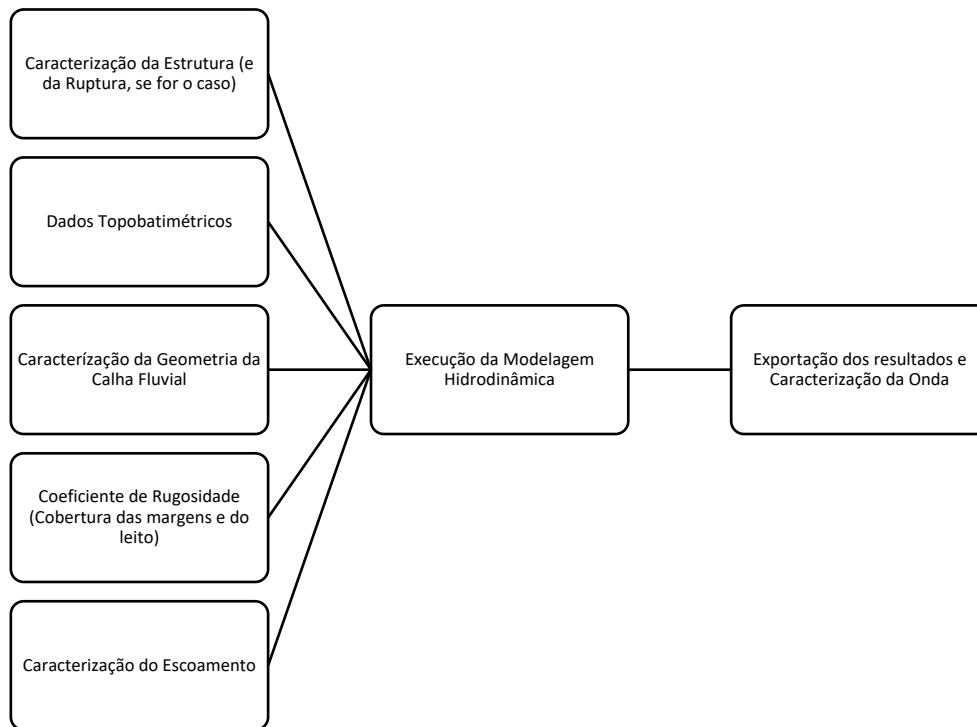
Frente a isto, os modelos hidrodinâmicos bidimensionais então, configuram-se como soluções mais coerentes quando objetiva-se analisar os efeitos de amortecimento produzidos pelas planícies de inundação, conferindo maior veracidade às previsões (LEITÃO, 2018), bem como obter a elevação da superfície da água e velocidade de forma discretizada (COUTINHO, 2015).

Destaca-se que, embora estes modelos computacionais de simulações hidrodinâmicas – como por exemplo, Mike 11, HEC-RAS, TELECMAC-2D, DAMBRK, FLDWAV – sejam um recurso bastante aplicado para a gestão e previsão de emergências (ou seja, em situações hipotéticas de caráter de urgência), suas versatilidades de funções, permitem a análise de escoamento e inundações, a jusante, de vazões defluentes em situações operativas diversas.

A utilização destes modelos de simulação requer alguns parâmetros de calibração, tais quais: vazão de pico na seção da barragem, caracterização da barragem e da ruptura (se for o caso), dados topobatimétricos, dados de geometria do canal de propagação, coeficiente de rugosidade do leito e das planícies de inundação, regime de escoamento, eventuais contribuições de tributários e inserção de possíveis estruturas de controle hidráulico, soleiras, reservatórios, entre outros (BRASIL, 2005).

A Figura 4 apresenta um resumo do processo de modelagem hidrodinâmica por meio de simulações computacionais.

**Figura 4** – Resumo do processo de modelagem hidrodinâmica e caracterização da mancha de inundação gerada



Fonte: Pereira *et al.* (2018).

### 3.5 COEFICIENTE DE RUGOSIDADE

#### 3.5.1 Conceitos

Nos canais classificados como naturais, como córregos ou rios, onde usualmente são alocadas as estruturas das barragens, o escoamento de água se processa pela ação da gravidade. Na região de contato entre o fluido e o perímetro molhado do canal, surge uma força de resistência que se opõe ao movimento e é função da viscosidade e rugosidade do canal (PORTO, 2006).

Uma das equações de resistência proposta para solucionar problemáticas de escoamentos livres é a fórmula de Manning (1891), obtida empiricamente:

$$V = \frac{1}{n} \cdot R_h^{2/3} \cdot I_0^{1/2}$$

Onde:

- $V$ : Velocidade de escoamento (m/s);  
 $n$ : Coeficiente de rugosidade de Manning;  
 $R_h$ : Raio hidráulico (m);  
 $I_0$ : Declividade de fundo do canal (m/m).

Embora tenha sido elaborada, à princípio, para escoamentos permanentes, uniformes e turbulentos rugosos, esta equação pode ser utilizada como uma hipótese simplificadora para resolução das equações completas de escoamentos não permanentes variados – que é o caso de cursos d'água naturais (PORTO, 2006).

O coeficiente de rugosidade é altamente variável e dependente de diversos fatores (CHOW, 1959). Segundo Kidson *et al.* (2002), inundações com níveis d'água mais elevados podem encontrar outras fontes de resistência ao fluxo, como por exemplo a vegetação.

Cita-se ainda, que processos erosivos e de sedimentação também possuem influência sobre o coeficiente de rugosidade (PORTO, 2006), o que dificulta ainda mais a determinação de uma modelagem hidráulica com precisão.

Quando há o extravasamento de água para as planícies de inundação adjacentes à calha do rio, as condições de superfície e cobertura vegetal das margens também deve ser levada em consideração para a simulação hidrodinâmica das cheias, principalmente pelo fato de que o coeficiente de rugosidade destas áreas é usualmente maior do que na própria calha do rio (CHOW, 1959).

Nos Quadros 7 e 8, apresentados a seguir, pode-se comparar a variabilidade das faixas de valores do coeficiente de rugosidade (Manning), presentes na literatura, para diferentes tipos de superfície.



**Quadro 7** – Comparação de valores de coeficientes de rugosidade de superfícies encontrados na literatura

	<b>Tipo de Superfície</b>	<b>Eletrobras (2003)</b>	<b>Porto (2006)</b>	<b>Chow (1959)</b>
<b>Canais</b>	<b>Em Rocha (Regular)</b>	0,030 a 0,038	0,025 a 0,035	0,025 a 0,040
	<b>Em Concreto</b>	0,013 a 0,017	0,012 a 0,018	0,011 a 0,027
	<b>Em Terra (limpo e uniforme)</b>	0,018 a 0,027	0,017 a 0,025	0,016 a 0,030
<b>Rios</b>	<b>Com pouca vegetação nas margens</b>	0,030 a 0,040	0,050 a 0,080	0,025 a 0,060 (larguras maiores que 30 m)
	<b>Com vegetação nas margens</b>	0,040 a 0,050	0,075 a 0,15	0,034 a 0,100 (larguras maiores que 30 m)
<b>Margens</b>	<b>Pastagens</b>	-	-	0,025 a 0,050
	<b>Áreas de Cultivo</b>	-	-	0,020 a 0,050
	<b>Arbustos</b>	-	-	0,035 a 0,16
	<b>Árvores</b>	-	-	0,11 a 0,160

Fonte: Eletrobras (2003), Porto (2006) e Chow (1959). Organizado pela autora.

**Quadro 8** – Coeficientes de rugosidade (Manning) para diferentes classes e materiais

<b>Kanashiro (2016)</b>		
	<b>Descrição</b>	<b>n</b>
<b>Condutos naturais</b>	Limpo e Reto	0,030
	Escoamento Vagarosos e com Poças	0,040
	Rio Típico	0,035
<b>Planícies Inundadas</b>	Pasto	0,035
	Cerrado Leve	0,050
	Cerrado Pesado	0,075
	Floresta	0,15
<b>Viseu (2006)*</b>		
	<b>Descrição</b>	<b>n</b>
<b>Planícies Inundadas</b>	Vale regular com vegetação de altura desprezível face à altura da onda	0,03
	Vale regular de altura comparável à altura da onda ou vale tortuoso com vegetação desprezível	0,04
	Vale tortuoso com vegetação densa	0,05
	Zona Urbana	0,06
*Valores originais fornecidos para o coeficiente de Manning-Strickler, que é dado pelo inverso do coeficiente de Manning (n).		

Fonte: Kanashiro (2016) e Viseu (2006). Organizado pela autora.

Ainda que seja possível adotar valores pré-definidos provenientes de pesquisas anteriores, não há garantias de que estes dados contribuam para o desenvolvimento de um modelo próximo da realidade.

No caso de elaboração de mapas de inundação para planos emergenciais de barragens, isto se torna um fator crucial, afinal, as simulações de cheias hipotéticas devem ser as mais verídicas possíveis para terem caráter funcional.

Segundo recomendações da United States Army Corps of Engineers-USACE (2016), os valores deste coeficiente devem sempre ser calibrados quando informações de níveis d'água existirem. Na ausência destes dados, é sugerido o uso de valores determinados previamente para outros rios sob condições similares ou obtidos por meio de atividade experimentais.

A calibração e obtenção de valores para o coeficiente de Manning (rugosidade) tem se mostrado um trabalho bastante desafiador (KIDSON *et al.*, 2002; SUDHAUS *et al.*, 2008; COOK, 1987), embora novas tecnologias, como o perfilamento a laser, utilizado para detecção e análise do terreno, possam ser utilizadas com o propósito de melhorar a determinação deste parâmetro.

No entanto, como aponta Ballesteros *et al.* (2011), os dispositivos dotados de feixes à laser são desprovidos da capacidade de analisar a superfície abaixo do nível d'água, o que impede a caracterização do leito de rios e, conseqüentemente, do coeficiente de rugosidade.

Para as simulações de ruptura hipotéticas de barragens, este coeficiente também tem sido estimado a partir da combinação de mapas topográficos, levantamentos de campo e mapas de uso e ocupação do solo, passíveis de serem manipulados, atualmente, em Sistema de Informações Geográficas (SIGs), capazes de integrar informações espaciais, combiná-las e produzir dados geocodificados (CÂMARA; ORTIZ, 1998).

Também é possível encontrar outras metodologias para determinação deste parâmetro, como por exemplo calibrar as tentativas com o auxílio de réguas liminimétricas e registros de vazões anteriores ou, ainda, por meio da construção de uma “mancha falada”, por meio do depoimento de moradores locais (MARANGONI *et al.* 2017) e/ou pelo levantamento de marcas do nível d'água de cheias históricas ao longo do trecho de estudo (BALLESTEROS *et al.*, 2011).

### 3.5.2 Efeito sobre caracterização de cheias

Em trabalhos anteriores desenvolvidos, foi possível determinar, por exemplo, que a vazão máxima (KIDSON *et al.*, 2002), o tempo de pico da onda de inundação (COLLISCHONN; TUCCI, 1997) e o nível d'água (BAO; ZHAO, 2011) são parâmetros diretamente sensíveis à variação do coeficiente de rugosidade.

Para análise do efeito do valor de Manning sobre os parâmetros de caracterização de cheias, é importante compreender que seu comportamento difere sob duas perspectivas de ocorrência: na calha principal de escoamento e nas planícies de inundação além das margens.

Estas análises são elucidadas a partir do levantamento de referências já existentes e pesquisas que avaliaram a influência da cobertura de áreas adjacentes, em relação ao escoamento principal e as planícies aluviais e, conseqüentemente, o coeficiente de rugosidade sobre parâmetros de caracterização das ondas de inundação produzidas pela modelagem hidrodinâmica.

Chow (1959) concluiu que o valor do coeficiente de Manning diminui conforme aumenta-se a vazão e o nível d'água. Isto porque quando o nível está mais raso, as imperfeições do canal ficam pronunciadas e a resistência ao fluxo aumenta.

Entretanto, esta condição deve ser cuidadosamente avaliada, uma vez que, quando há o extravasamento da água para as margens, uma superfície rugosa e bem vegetada, provoca o aumento deste coeficiente (CHOW, 1959).

Analogamente, Kidson *et al.* (2002) determinou em sua pesquisa que, em canais aluvionares, o coeficiente de Manning tende a diminuir com a elevação do nível d'água até a cota das margens. Este mesmo autor determinou que para uma diferença de 50% nos valores de coeficiente de rugosidade, houve uma divergência de 40% nos valores de vazões fluviais.

O estudo de rompimento hipotético de uma barragem desenvolvido por Colischonn e Tucci (1997) demonstrou que a rugosidade do leito do rio de análise

contribuiu expressivamente para a variação do tempo de propagação de onda, de maneira diretamente proporcional, e que a sensibilidade destes parâmetros também varia com a distância, tendo a barragem como referência.

A interação entre o coeficiente de rugosidade e a inclinação é de grande influência na velocidade do fluxo. Uma declividade acentuada resulta em altas velocidades (CHOW, 1959), no entanto, o coeficiente de Manning pode apresentar uma baixa sensibilidade de variação para velocidades muito altas de escoamento (KAISER *et al.*, 2015).

No que tange às áreas marginais dos canais de propagação da inundação, deve-se atentar ao fato de que a variação do coeficiente de rugosidade está atrelada à submersão, ou não, da vegetação existente. Para melhor entendimento, deve-se frisar, também, que as planícies de inundação são desprovidas de paredes que condicionem o escoamento do fluxo.

Caso as margens sejam dotadas de vegetação ripária, como a mata ciliar, pode-se levar à redução da velocidade da onda, provocando o aumento da profundidade do fluxo nestas áreas, com atenuação da celeridade no momento de vazões de pico (STRAATSMA *et al.*, 2008). Paralelamente, valores mais baixos de coeficiente de rugosidade resultarão em previsões de níveis d'água em cotas mais baixas (DELAI *et al.*, 2018).

Seguindo a mesma linha de raciocínio, Bao e Zao (2001) concluíram em seu trabalho, que a tendência de variação do coeficiente de Manning acompanhava àquela do nível d'água do escoamento sobre as planícies de inundação. E, assim, o coeficiente de rugosidade aumentava com o processo ascendente do nível d'água.

Para as planícies de inundação adjacentes, outro fator de incerteza para determinação do coeficiente de rugosidade fica à cargo de mudanças na cobertura vegetal, especialmente, para quando o uso histórico do solo não é conhecido, provocando, de certa forma, algum efeito (SUDHAUS *et al.*, 2008).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

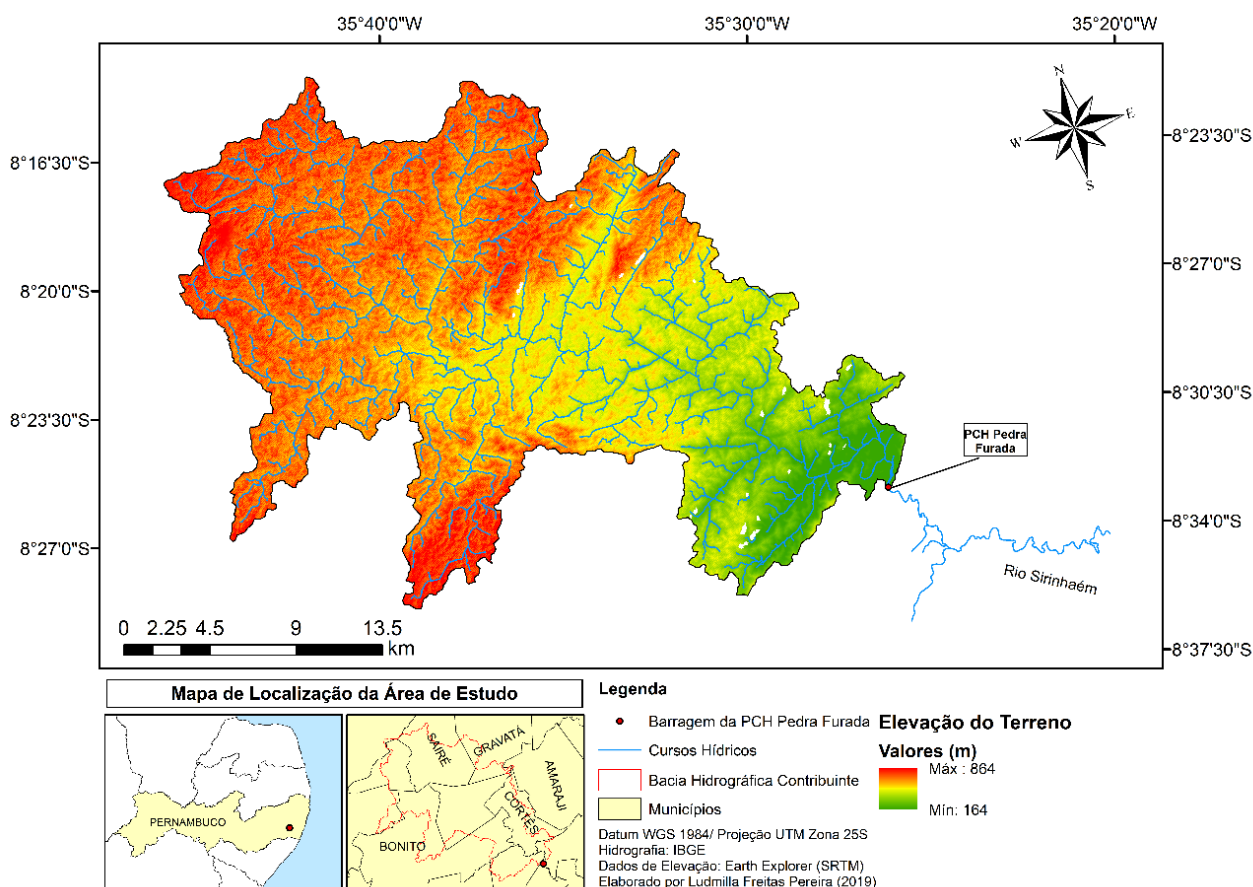
### 4.1 ÁREA DE ESTUDO

O local para o desenvolvimento do presente estudo é a área a jusante da PCH Pedra Furada, localizada em território brasileiro nos municípios de Ribeirão e Joaquim Nabuco, estado do Pernambuco.

O aproveitamento hidrelétrico, com potência instalada de 6,5 MW, está situado no curso d'água Sirinhaém, distando cerca de 91 km da foz no Oceano Atlântico, cujas coordenadas são 8° 30' 59" S (Latitude) e 35° 29' 02" W (Longitude).

Na Figura 5, a seguir, apresenta-se a bacia hidrográfica contribuinte do empreendimento e o Quadro 9 sua respectiva caracterização fisiográfica (obtida por meio das ferramentas *Spatial Analyst* do ArcGis).

**Figura 5 – Bacia hidrográfica contribuinte e localização da PCH Pedra Furada**



Fonte: Própria autora.

**Quadro 9** – Caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Pedra Furada

Característica Fisiográfica	Simbologia	Descrição	Equação	Valores para a Bacia da PCH Pedra Furada
Área de Drenagem (km <sup>2</sup> )	<i>A</i>	Projeção horizontal inclusa entre os divisores topográficos da bacia.	-	549,24
Perímetro (km)	<i>P</i>	Medida do contorno da bacia hidrográfica.	-	200,38
Comprimento Axial da Bacia (km)	<i>L</i>	O comprimento axial da bacia é medido seguindo o curso d'água mais longo desde a desembocadura até a cabeceira mais distante da bacia.	-	63,81
Largura Média da Bacia (km)	<i>B</i>	É obtida dividindo-se a área pelo comprimento da bacia.	$B = \frac{A}{L}$	8,60
Comprimento Total dos Cursos Hídricos (km)	<i>L<sub>t</sub></i>	Somatório dos comprimentos de todos os cursos d'água que compõe a bacia.	-	705
Ordem da Bacia	<i>n</i>	É uma classificação que reflete o grau de ramificação ou bifurcação dentro de uma bacia.	-	9
Altitude Máxima (m)	<i>H<sub>máx</sub></i>	Elevação do terreno correspondente ao ponto mais alto do curso hídrico principal.	-	760
Altitude Mínima (m)	<i>H<sub>mín</sub></i>	Elevação do terreno correspondente ao ponto mais baixo do curso hídrico principal.	-	168
Coefficiente de Compacidade	<i>K<sub>c</sub></i>	Relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo de área igual à da bacia. A tendência a cheias é mais acentuada quanto mais próximo da unidade for este coeficiente.	$K_c = 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$	2,39
Fator de Forma	<i>K<sub>f</sub></i>	Relação entre a largura média e o comprimento axial da bacia. Uma bacia com um fator de forma baixo é menos sujeita a enchentes que outra de mesmo tamanho e com maior fator de forma.	$K_f = \frac{B}{L} = \frac{A}{L^2}$	0,13
Densidade de Drenagem (km/km <sup>2</sup> )	<i>D<sub>d</sub></i>	Relação entre o comprimento total dos cursos d'água de uma bacia e sua área total. Varia inversamente com a extensão do escoamento, fornecendo uma indicação da eficiência da drenagem.	$D_d = \frac{L_t}{A}$	1,28
Declividade do rio Sirinhaém (dentro dos limites da bacia)	<i>D</i>	Diferença total de elevação, entre o ponto mais alto e mais baixo do leito, dividida pela extensão do curso d'água entre estes dois pontos.	$D = \frac{(H_{máx} - H_{mín})}{L}$	0,0093

Fonte: Villela e Matos (1975). Adaptado pela autora.

## 4.2 BASE DE DADOS UTILIZADA

### 4.2.1 Levantamentos de campo

Os dados topobatimétricos que subsidiaram as simulações hidrodinâmicas do presente de estudo, foram cedidos pela empresa Atiaia Energia que autorizou seu uso (conforme tramitação apresentada no Apêndice 1) para tal finalidade acadêmica.

O levantamento batimétrico utilizado contemplou 38 seções transversais à calha de escoamento principal, a jusante da PCH Pedra Furada, produzindo uma malha de pontos geodésicos definidos com a respectiva profundidade do nível d'água. Esta atividade foi executada por meio de um ecobatímetro monofeixe (ODOM Teledyne, modelo CVM Echotrac), com precisão de 0,01 m e alcance máximo de 600 m.

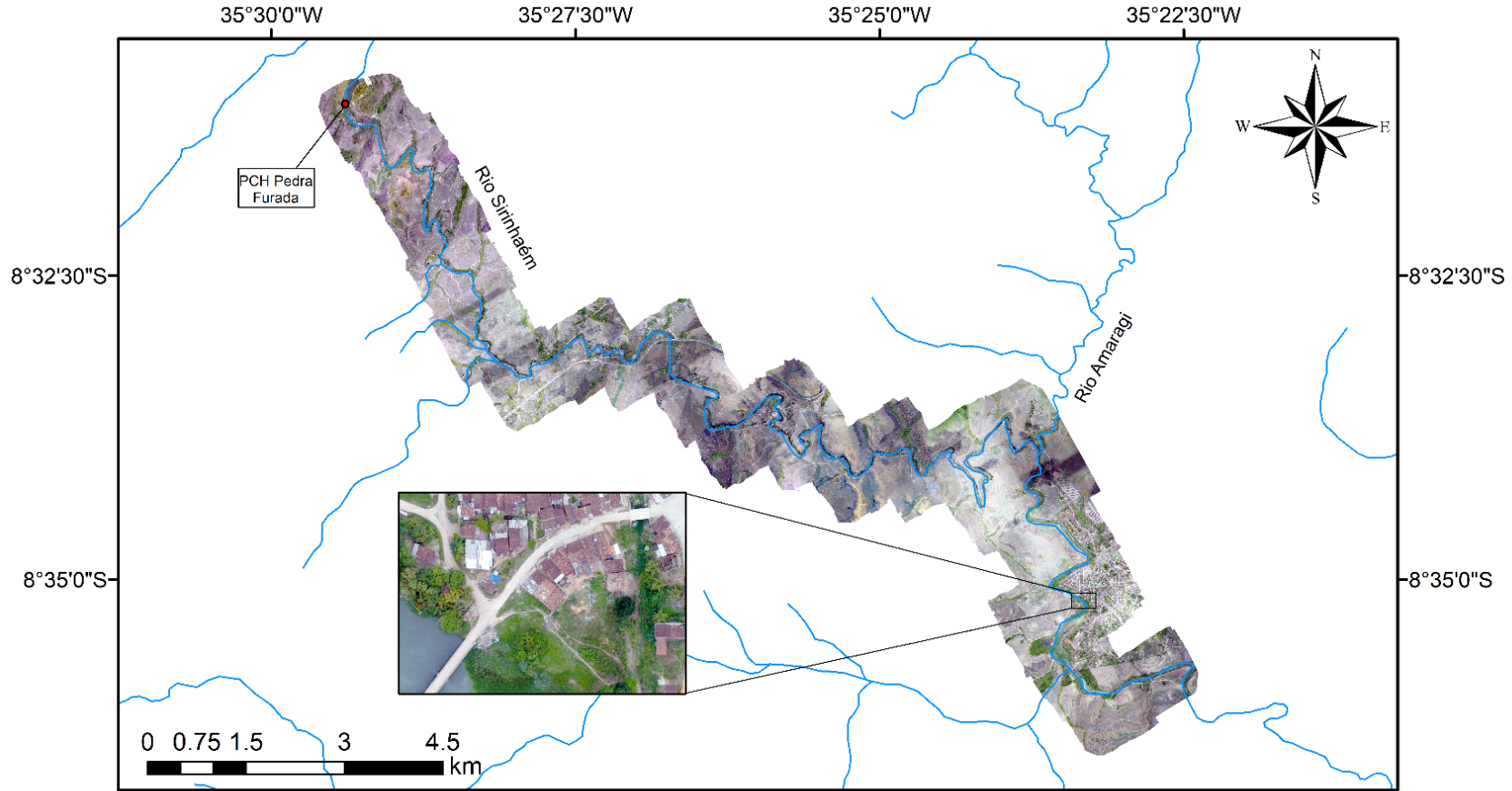
Concomitantemente à execução das seções batimétricas, foram levantados dados topográficos da área seca, nas margens, registrando a posição de pontos em três direções (XYZ) por meio do sistema GNSS RTK Trimble R4.

Adicionalmente, a equipe de campo realizou um aerolevanteamento com uso de veículo aéreo não tripulado (VANT), cujo sobrevoo (a uma altura de 200 m) capturou imagens ortorretificadas com resolução espacial de 10,2 cm/pixel (Figura 6).

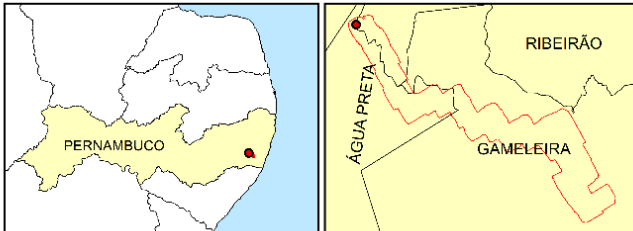
Este levantamento de campo também produziu curvas de nível com equidistância de 1 metro, a partir das quais criou-se um modelo digital de terreno baseado em uma rede triangular irregular de pontos (*TIN – Triangular Irregular Network*) apresentado na Figura 7.

Todos os dados foram levantados em campo em janeiro de 2017 e georreferenciados no Datum WGS 1984, projeção UTM, Zona 25 S.

**Figura 6 – Ortofoto da área de estudo**



**Mapa de Localização da Área de Estudo**



**Legenda**

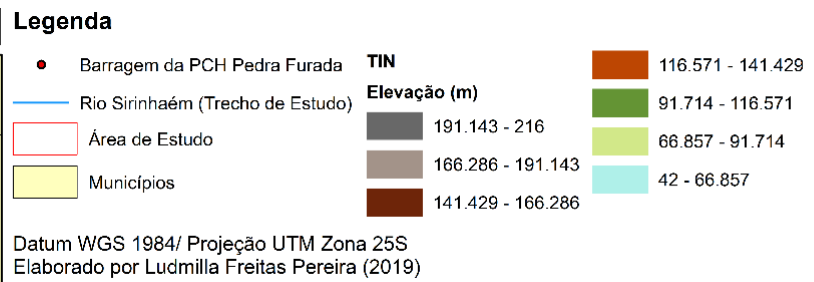
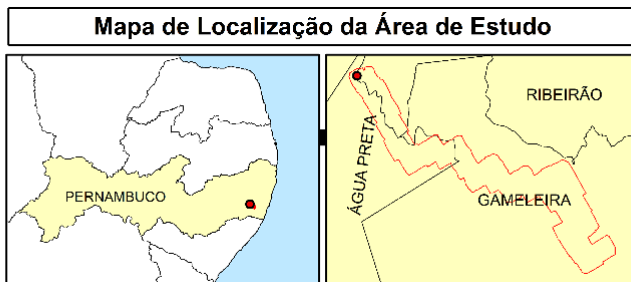
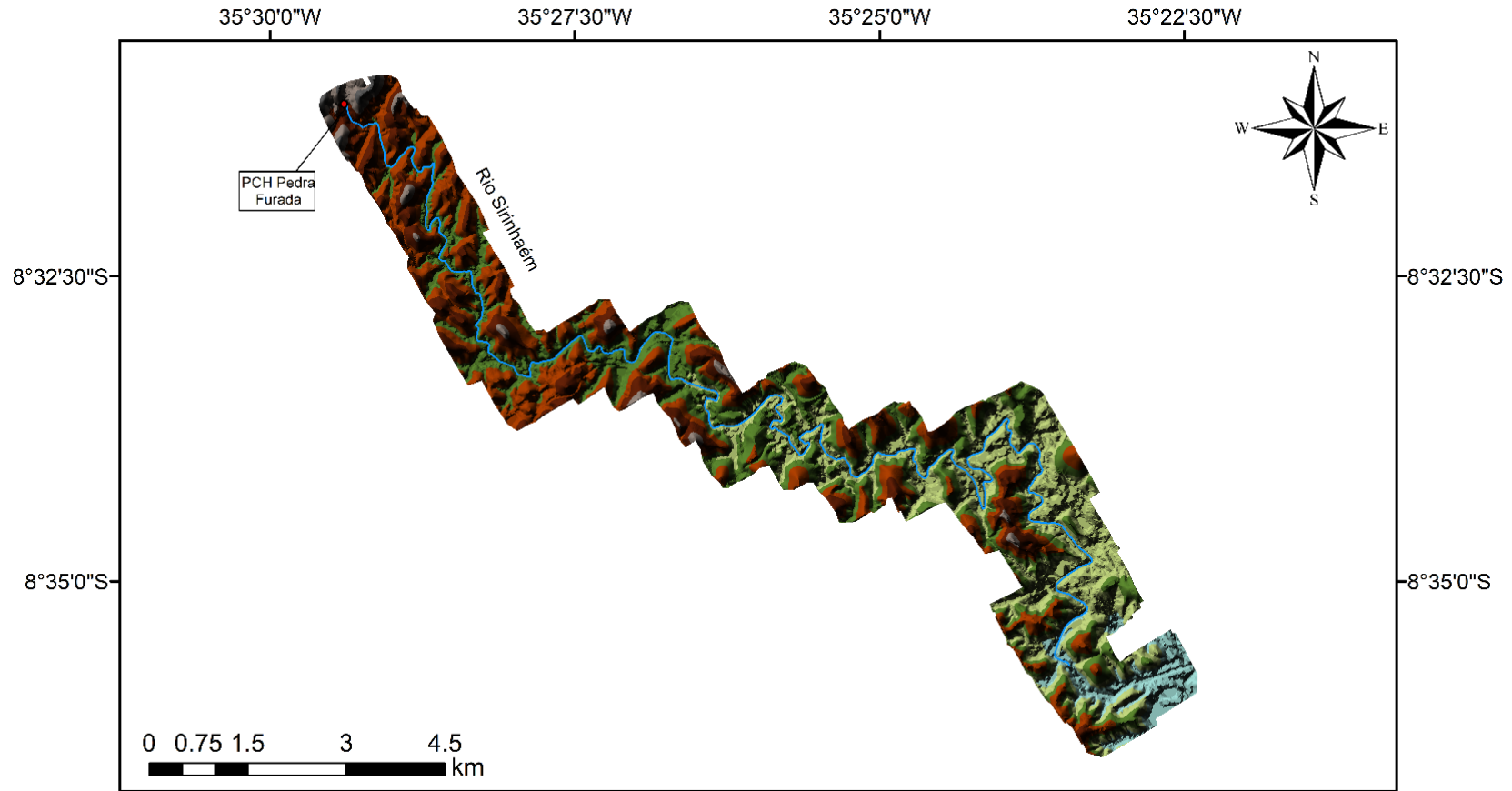
- Barragem da PCH Pedra Furada
- Cursos Hídricos
- Área de Estudo
- Municípios

Datum WGS 1984/ Projeção UTM Zona 25S  
 Hidrografia: IBGE  
 Data do levantamento com VANT: jan/2017  
 Elaborado por Ludmilla Freitas Pereira (2019)

Fonte: Atiaia Energia (2017). Adaptado pela autora.



**Figura 7 – Modelo Digital de Terreno (TIN) da área de estudo**



Fonte: Atiaia energia (2017). Adaptado pela autora.

#### 4.2.2 Dados históricos de hidrologia

Os dados hidrológicos fornecidos pela Agência Nacional de Águas (ANA) por meio do banco de dados público intitulado “Hidroweb”, foram analisados em dois momentos no presente estudo.

Primeiramente, as estações fluviométricas localizadas na área compreendida pela bacia hidrográfica contribuinte da PCH Pedra Furada foram utilizadas para a estimativa de vazões de cheia para diferentes tempos de retorno que subsidiaram os cenários de simulação hidrodinâmica.

E, posteriormente, os postos fluviométricos localizados no rio Sirinhaém e Amaragi (que tem a foz logo a montante do município de Gameleira) foram consultados para a calibração dos coeficientes de rugosidade, a partir das respectivas curvas-chaves.

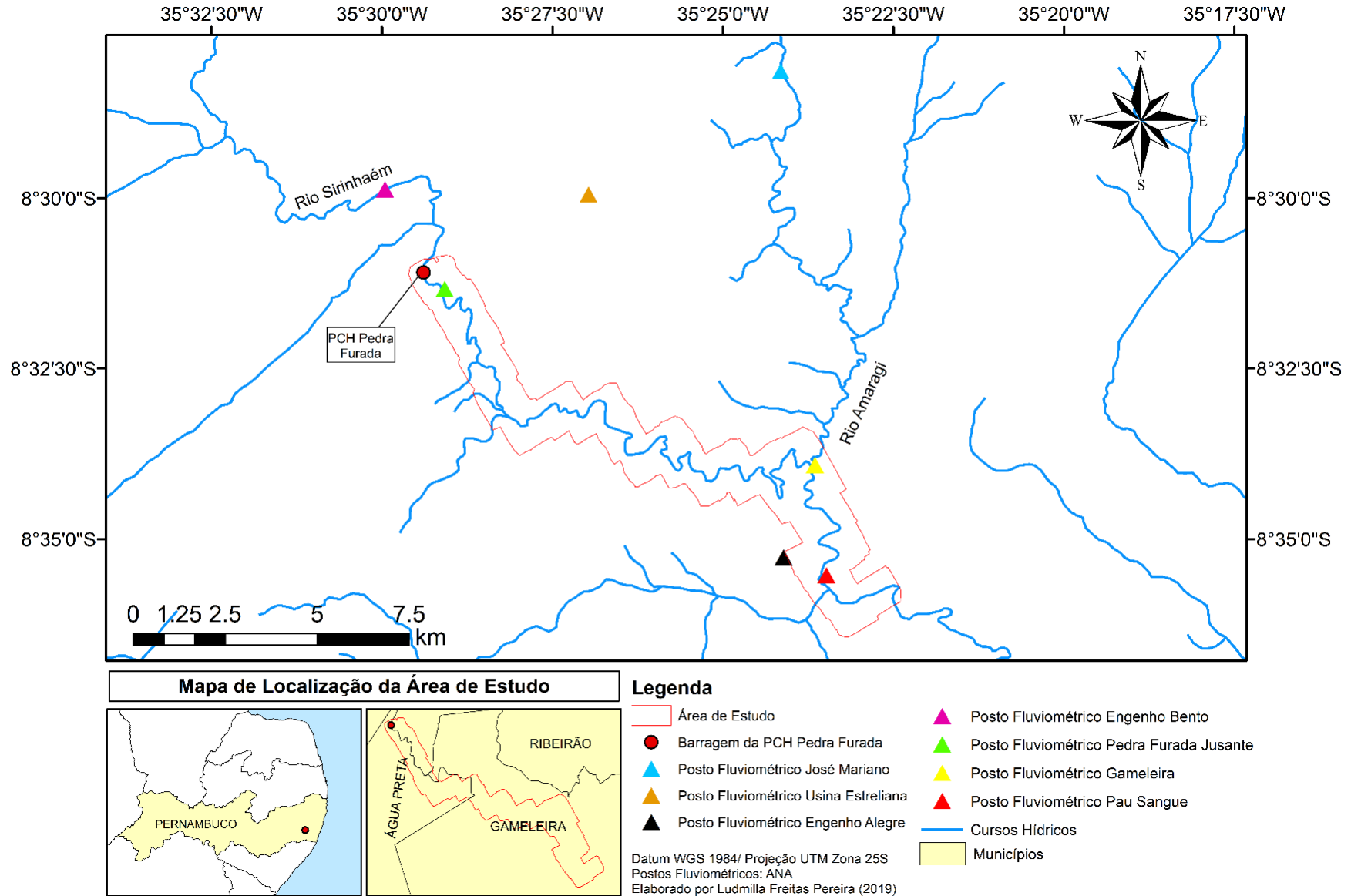
Posteriori a análise de consistência dos postos fluviométricos localizados nas áreas de interesse (Figura 8) por meio da verificação de disponibilidade de dados e avaliação da localização destes instrumentos, foram adotadas as leituras e características dos postos apresentados no Quadro 10, a seguir.

**Quadro 10** – Especificações técnicas dos postos fluviométricos escolhidos

Nome da Estação Fluviométrica	Código Hidroweb	Rio	Município	Latitude	Longitude	Área de Drenagem	Extensão de dados
Engenho Bento	39450000	Sirinhaém	Joaquim Nabuco – PE	S 8° 29' 49.92"	W 35° 29' 52.08"	537 km <sup>2</sup>	1999 a 2018
José Mariano	39430000	Amaragi	Ribeirão (PE)	S 8° 28' 3.00"	W 35° 24' 5.04"	295 km <sup>2</sup>	2002 a 2019

Fonte: ANA (2019). Organizado pela autora.

**Figura 8 – Postos fluviométricos consultados no Hidroweb**



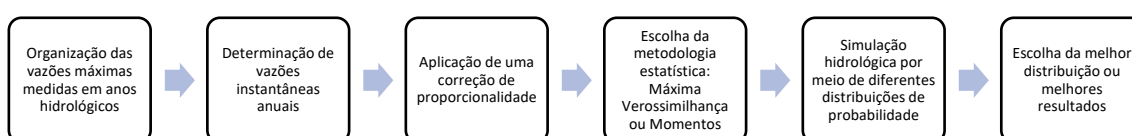
Fonte: Própria autora

#### 4.3 DETERMINAÇÃO DAS VAZÕES DE CHEIA

O presente estudo utilizou para a produção de seus resultados, vazões de cheia para diferentes tempos de retorno referente à área de drenagem correspondente a bacia hidrográfica contribuinte da PCH Pedra Furada.

O processo de estimativa hidrológica adotado é apresentado no fluxograma da Figura 9 a seguir.

**Figura 9** – Processo de simulação de vazões de cheia para diferentes tempos de retorno



Fonte: Própria autora.

Para efeitos de determinação das vazões de cheia, utilizou-se o posto Engenho Bento (código 39450000), sendo o único localizado na bacia hidrográfica contribuinte da PCH Pedra Furada com dados suficientes.

Para o desenvolvimento do estudo, primeiramente, construiu-se uma série concisa de dados com máximos anuais. Destaca-se que foram considerados os máximos relativos ao ano hidrológico (sequência de doze meses contados a partir da estação chuvosa) e não ao ano civil, conforme recomendações de Pereira (2015) e Pinheiro (2011).

Para a área de interesse do presente estudo, considerou-se o ano hidrológico iniciando-se em março, a partir da análise de períodos chuvosos e de estiagens. No Quadro 11, a seguir, apresenta-se a série de máximos anuais utilizada.

**Quadro 11** – Série de vazões máximas anuais para o posto fluviométrico Engenho Bento

ANO HIDROLÓGICO	VAZÃO MÁXIMA ANUAL (m³/s)
2000	185.58
2001	36.81
2002	103.78
2003	114.56
2004	125.66
2005	131.34
2006	70.7
2007	80.86
2008	68.26
2009	84.76
2010	120.42
2011	211.08
2012	23.09
2013	74.33
2014	63.76
2015	60.66
2016	106.62
2017	202.53

Fonte: ANA (2019). Adaptado pela autora.

Posteriori à catalogação dos máximos anuais para o local do empreendimento, é recomendada (TUCCI, 2001; PEREIRA, 2015; PINHEIRO, 2011) a aplicação de um fator de correção a estes valores pela equação de Fuller (1914):

$$Q_{\text{instantânea}} = Q(1 + 2,66A^{-0,3})$$

Em que:

$Q_{\text{instantânea}}$  = Vazão máxima instantânea (m³/s);

Q = vazão máxima medida (m³/s);

A = área da bacia hidrográfica contribuinte da PCH (km²).

Ressalta-se que, mediante recomendações da Eletrobras (2003), ANA (2016c), e demais autores (TUCCI, 2001; PEREIRA, 2015), após a construção de uma série consistente de dados, as vazões ainda devem ser transpostas para o local do eixo do barramento por simples aplicação de proporcionalidade entre áreas de drenagem do posto fluviométrico escolhido e da barragem.

No Quadro 12, a seguir, apresenta-se a série de máximos anuais ajustados para o local do empreendimento.

**Quadro 12 – Série de máximos anuais corrigidos**

<b>ANO HIDROLÓGICO</b>	<b>VAZÃO MÁXIMA ANUAL (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>VAZÃO INSTANTÂNEA (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>VAZÃO CORRIGIDA (m<sup>3</sup>/s)</b>
<b>2000</b>	185.58	259.96	<b>265.89</b>
<b>2001</b>	36.81	51.56	<b>52.74</b>
<b>2002</b>	103.78	145.38	<b>148.69</b>
<b>2003</b>	114.56	160.48	<b>164.14</b>
<b>2004</b>	125.66	176.03	<b>180.04</b>
<b>2005</b>	131.34	183.98	<b>188.18</b>
<b>2006</b>	70.7	99.04	<b>101.30</b>
<b>2007</b>	80.86	113.27	<b>115.85</b>
<b>2008</b>	68.26	95.62	<b>97.80</b>
<b>2009</b>	84.76	118.73	<b>121.44</b>
<b>2010</b>	120.42	168.69	<b>172.53</b>
<b>2011</b>	211.08	295.69	<b>302.43</b>
<b>2012</b>	23.09	32.35	<b>33.08</b>
<b>2013</b>	74.33	104.12	<b>106.50</b>
<b>2014</b>	63.76	89.32	<b>91.35</b>
<b>2015</b>	60.66	84.97	<b>86.91</b>
<b>2016</b>	106.62	149.36	<b>152.76</b>
<b>2017</b>	202.53	283.71	<b>290.18</b>

Fonte: Própria autora.

De posse da série de vazões máximas instantâneas anuais adequadas ao local do empreendimento, iniciou-se o processo de simulação probabilística para diferentes tempos de retorno. Este procedimento foi desenvolvido com o software ALEA – Análise de Frequência Local de Eventos Anuais (DE LIMA; NAGHETTINI, 2001).

A utilização de modelos de distribuição de probabilidade teórica é uma técnica usual para a obtenção da extrapolação de eventos extremos para períodos de retorno elevados (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

Previamente à etapa de escolha da função de probabilidade que determinou a extrapolação das variáveis hidrológicas, definiu-se a metodologia de abordagem destas distribuições.

Naghettini e Pinto (2007) explicam que o Método dos Momentos consiste em igualar os momentos amostrais aos momentos populacionais. A solução dessa equação resultará nas estimativas dos parâmetros da distribuição de probabilidade em questão.

O Método da Máxima Verossimilhança, segundo Katz *et al.* (2002), busca maximizar uma função dos parâmetros da distribuição, chamada função verossimilhança. Ao se derivar essa função e igualá-la a zero, maximiza-se a probabilidade de um parâmetro representar uma população.

Na sequência, no que tange à escolha do modelo de distribuição de probabilidade, a Eletrobras (2003) recomenda que:

Para a definição das cheias de projeto, são utilizadas duas distribuições: exponencial de dois parâmetros (estimada pelo método dos momentos), sempre que a assimetria da amostra for superior a 1,5, e Gumbel (extremos do tipo I), para assimetrias amostrais inferiores a 1,5 (ELETROBRAS, 2003, p. 6-10).

Assim, julgou-se ser necessário obter uma análise de estatística descritiva dos dados de vazões, afim de auxiliar no processo de escolha da melhor distribuição estatística (Quadro 13).

**Quadro 13** – Análise de estatística descritiva da série de máximos anuais

	<b>Variável Original</b>	<b>Logaritmo da Variável</b>
<b>Tamanho da Amostra</b>	18	18
<b>Mínimo</b>	33.08	1.51957
<b>Máximo</b>	302.43	2.48062
<b>Média</b>	148.4339	2.11219
<b>Desvio Padrão</b>	76.2617	0.24624
<b>Mediana</b>	135.065	2.12832
<b>Coeficiente de Variação (Cv)</b>	0.5138	0.11658
<b>Coeficiente de Assimetria (Cs)</b>	0.752	-0.64474
<b>Coeficiente de Curtose (Ck)</b>	3.0117	3.78494

Fonte: Própria autora.

Para o presente estudo de frequência de cheias, adotou-se o Método dos Momentos e o modelo matemático de Gumbel para estimativa das vazões, frente que, quando combinados, os quantis ajustados apresentaram comportamento mais linear indicando boa correlação de pontos, além disto  $C_s = 0,752$ . A série final de resultados de vazões extremas é apresentada no Quadro 14.

**Quadro 14** – Resultados do estudo de frequência de cheias

TR (anos)	Gumbel de Máximos Quantis (m <sup>3</sup> /s)
10.000	661.8
5.000	620.5
1.000	524.8
500	483.6
200	429
100	387.6
50	346.1
25	304.3
10	247.9
5	203.3
2	135.9

Fonte: Própria autora.

#### 4.4 CLASSIFICAÇÃO DA COBERTURA DO SOLO DA ÁREA A JUSANTE

A partir das ortofotos coletadas por aerolevanteamento com VANT foi realizada a classificação da cobertura do solo utilizando-se o software eCognition 8.9, desenvolvido pela Trimble Germany GmbH.

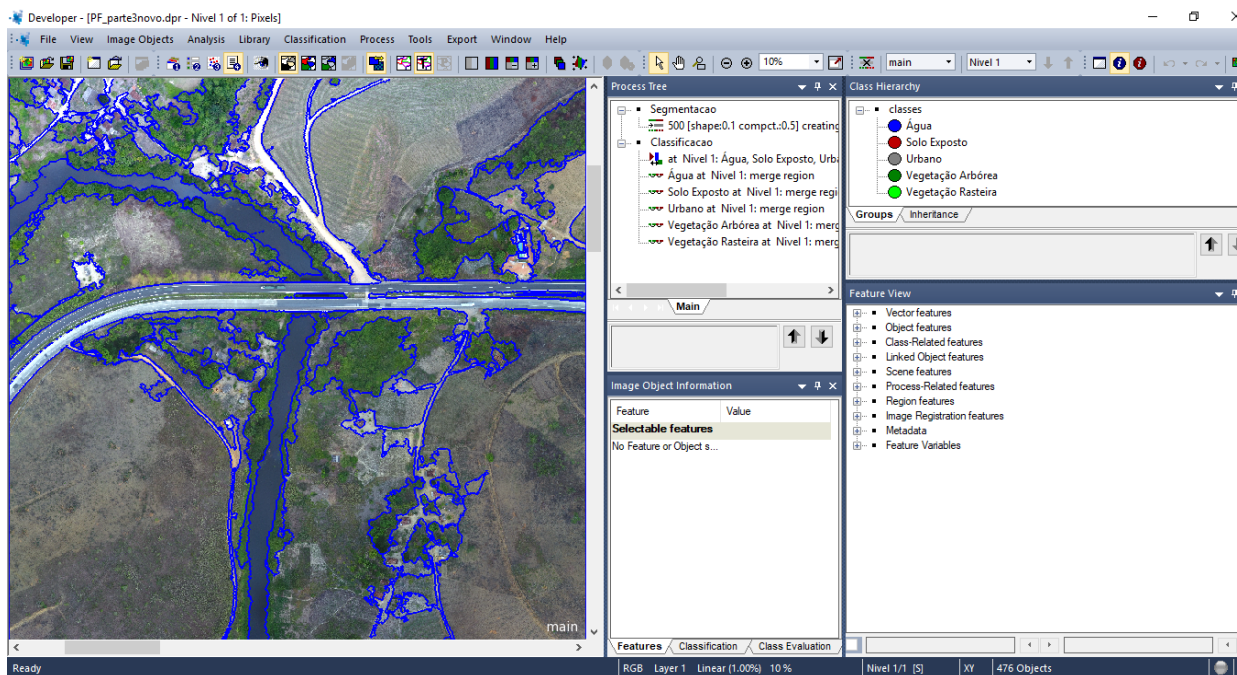
Como a ortofoto fornecida possui uma extensa área de abrangência e o arquivo digital apresenta um tamanho, relativamente, significativo, optou-se por dividir a imagem em cinco áreas, de tal forma que se pudesse trabalhar, paulatinamente, com áreas de projeto reduzidas.

Essa divisão da imagem permitiu uma melhor calibração dos processos do eCognition, uma vez que a ortofoto, como um todo, não apresentava uma resposta espectral homogênea, devido à diferença de contrastes, saturação, brilho e cores dos pixels. Além disto, reduziu-se o tempo de execução da classificação, porque trabalhou-se com imagens mais leves.

A classificação orientada a objeto, foi iniciada pela atividade de Segmentação, por meio do algoritmo *Multiresolution Segmentation*. Este processo foi repetido inúmeras vezes até que fossem atingidos fatores de escala adequados (*scale parameter* 500) e que fossem criados agrupamentos significativos de pixels semelhantes (*shape* 0.1 e *compactness* 0.5), conforme Figura 10.



**Figura 10** – Ilustração do processo de segmentação por meio do software eCognition



Fonte: Própria autora.

Não foram considerados pesos diferenciados para as bandas que compõe a imagem para a execução do processo de segmentação. Adotou-se, assim, que a ortofoto não apresenta uma melhor resposta espectral em uma das bandas específicas (RGB).

Na sequência, por meio da ferramenta intitulada Classificação, foram definidas as classes utilizadas para a categorização visual da imagem. Sendo elas:

- Água;
- Urbano;
- Solo exposto;
- Vegetação arbórea; e
- Vegetação rasteira.

Para que esta atividade fosse executada, foi necessário colher Amostras de Treinamento. Utilizou-se o critério de identificação de classes apresentado no Quadro 15.

**Quadro 15 – Chave de classificação de imagens**

Classe	Descrição	Identificação
Urbano	Áreas concretadas, pavimentos, residências e edificações, em geral, ou seja, que se constituem por obras antrópicas.	
Água	Corpos hídricos naturais ou artificiais, sejam estes lagos, lagoas, rios, riachos, reservatórios, entre outros.	
Solo Exposto	Áreas, que no momento de captação da imagem, se apresentavam desprovidas de vegetação, referindo-se, como o próprio nome diz, a regiões em que há exposição do solo.	
Vegetação Rasteira	Regiões ocupadas por gramíneas, áreas de pastagens e plantas de pequeno porte de coloração mais clara.	
Vegetação Arbórea	Áreas de florestas, arbustos e com colorações mais intensas devido à densidade frondosa das árvores	

Fonte: Própria autora.

Utilizando-se, ainda, a ferramenta de Classificação, selecionou-se o algoritmo executor *Nearest Neighbor* para que este fosse aplicado sobre todas as classes escolhidas de uso e ocupação do solo. Também foi realizada uma etapa de pós-tratamento, manual, para ajuste da classificação automática.

A Figura 11 e o Quadro 16, a seguir, apresentam o resultado da classificação da cobertura solo para toda a área de estudo, utilizando-se o método supervisionado, por meio do software eCognition.

**Quadro 16** – Quantificação das classes de cobertura do solo para a situação real da área de estudo

Classe	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentagem equivalente (%)
Água	1.03	3.85
Solo Exposto	2.22	8.28
Urbano	1.11	4.16
Vegetação Arbórea	2.02	7.56
Vegetação Rasteira	20.37	76.15
<b>Total</b>	<b>26.75</b>	<b>100</b>

Fonte: Própria autora.

Como as principais análises deste estudo foram realizadas entre os limites da Área de Preservação Permanente, fez-se necessário isolar somente estas faixas marginais, considerando-se 50 metros de largura em cada margem do rio Sirinhaém, tal como estipulado pela Lei Federal n. 12.651, de 25 de maio de 2012 (BRASIL, 2012), produzindo-se o mapa (Figura 12) e Quadro 17 apresentados, a seguir.

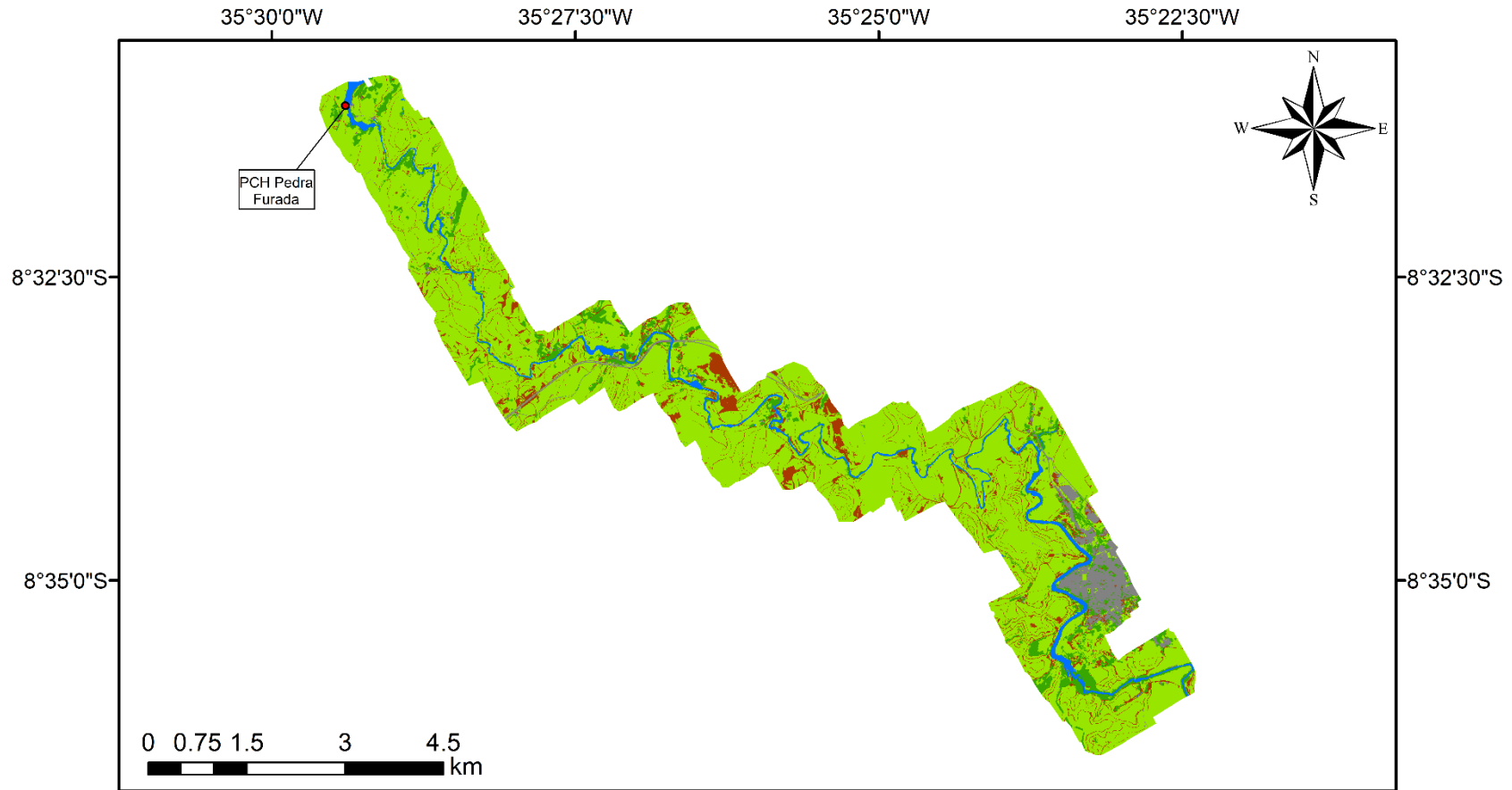
**Quadro 17** - Quantificação das classes para situação real de cobertura do solo da área de preservação permanente

Classe	Área APP (km <sup>2</sup> )	Porcentagem equivalente (%)
Água	0.02	0.66
Solo Exposto	0.25	8.67
Urbano	0.07	2.33
Vegetação Arbórea	0.52	17.97
Vegetação Rasteira	2.03	70.36
<b>Total</b>	<b>2.89</b>	<b>100.00</b>

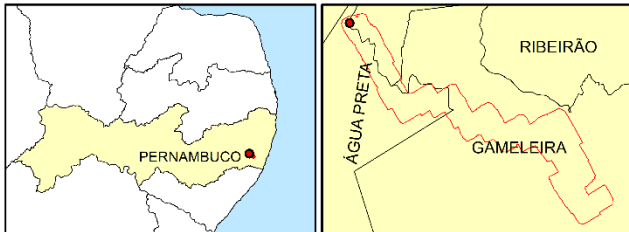
Fonte: Própria autora.

A classificação das imagens foi utilizada para a calibração e adoção dos valores do coeficiente de rugosidade, durante a modelagem hidrodinâmica, e, conseqüentemente, na produção de melhores resultados, quando da análise do cenário real da área a jusante da PCH Pedra Furada.

**Figura 11 – Classificação da cobertura do solo da situação real área de estudo**



**Mapa de Localização da Área de Estudo**

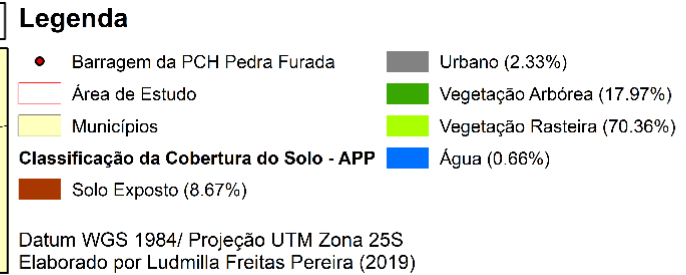
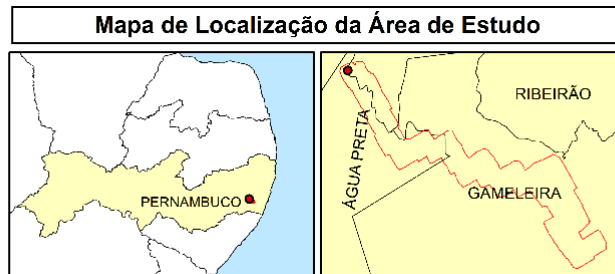
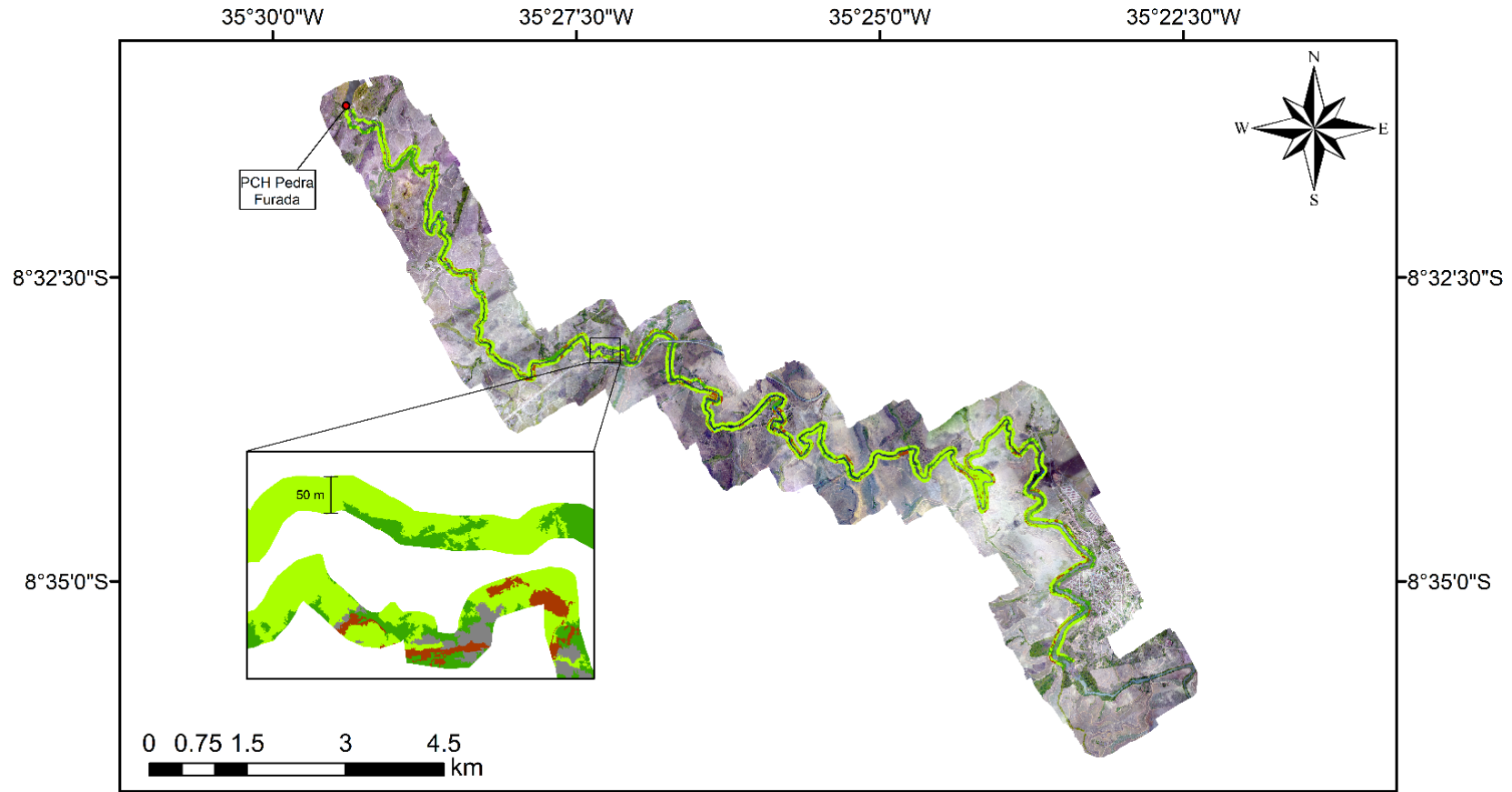


**Legenda**

- Barragem da PCH Pedra Furada
  - Área de Estudo
  - Municípios
  - Urbano (4.16%)
  - Vegetação Arbórea (7.56%)
  - Vegetação Rasteira (76.10%)
  - Água (3.85%)
  - Solo Exposto (8.28%)
- Datum WGS 1984/ Projeção UTM Zona 25S  
Elaborado por Ludmilla Freitas Pereira (2019)

Fonte: Própria autora

**Figura 12 – Classificação da cobertura do solo para a situação real da APP da área de estudo**



Fonte: Própria autora

## 4.5 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

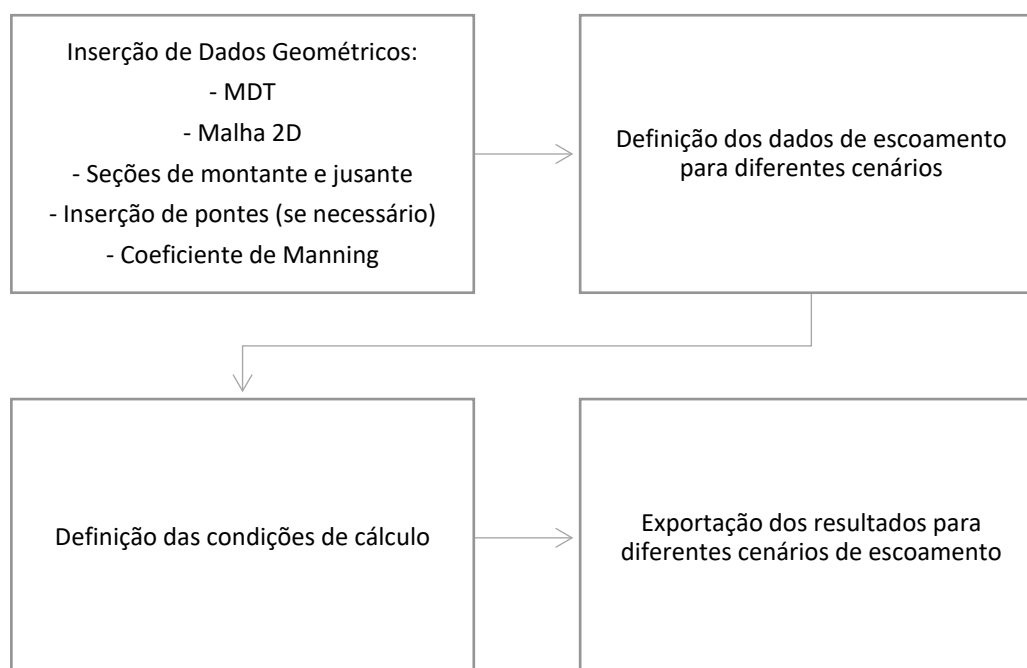
### 4.5.1 Resumo das etapas

Realizado o tratamento dos dados de topografia, batimetria do canal e de posse dos dados hidrológicos, foi utilizado o software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center/ River Analysis System), versão 5.0.7, para a produção de manchas de inundação para diferentes cenários.

Utilizou-se a forma de escoamento bidimensional, assim como o modelo de Onda de Difusão para os equacionamentos hidráulicos das simulações pretendidas neste software.

A Figura 13, a seguir, apresenta um resumo das atividades desenvolvidas por meio deste modelo hidrodinâmico.

**Figura 13** – Síntese das atividades desenvolvidas no HEC-RAS 2D



Fonte: Própria autora.

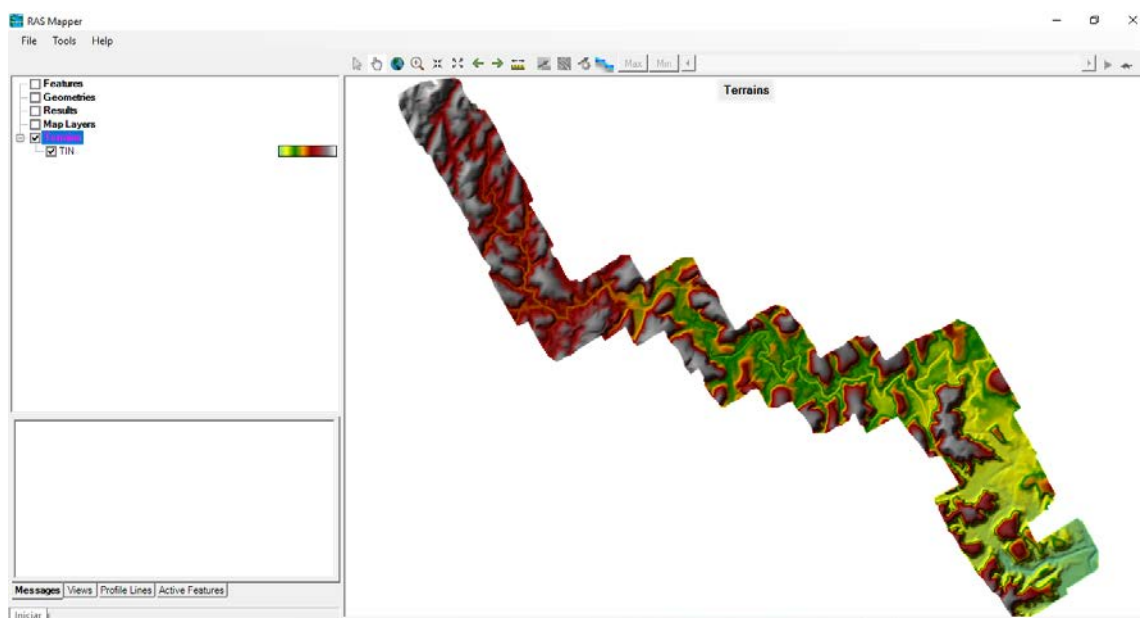
## 4.5.2 Inserção de dados geométricos

### 4.5.2.1 *Modelo digital de terreno*

Inicialmente, inseriu-se no software HEC-RAS, por meio da ferramenta RAS Mapper, o modelo digital de terreno (TIN), em formato raster (resolução espacial de 1 metro), produzido a partir das informações topográficas colhidas em campo, conforme item 4.2.1.

A Figura 14, a seguir, apresenta o MDT inserido no software HEC-RAS 5.0.7.

**Figura 14** – Inserção do MDT referente à área de estudo no software HEC-RAS



Fonte: Própria autora.

### 4.5.2.2 *Malha de escoamento*

Sobre o MDT de referência, delimitou-se uma malha quadriculada com resolução de células de 20 metros, referente à área sobre a qual se deu o escoamento bidimensional.

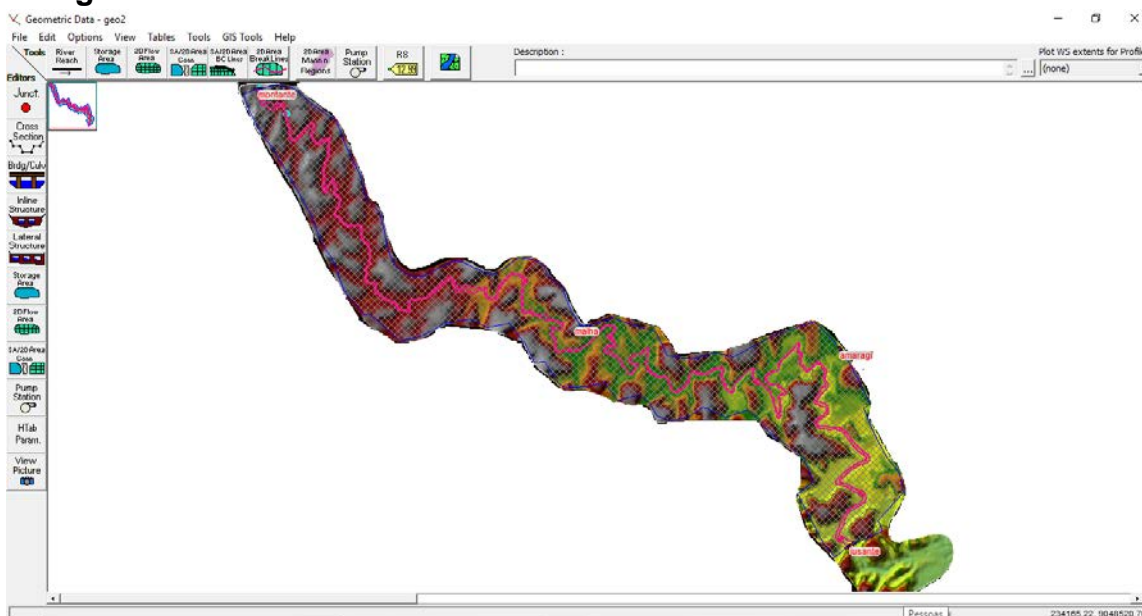
A face (ou aresta) de cada célula atua como uma seção transversal sobre o terreno subjacente ao traçado. Desta forma, permite-se o fluxo de água entre as células a partir da conformação do terreno representado pelas faces das células e o volume de água contido em cada uma (USACE, 2016).

Ressalta-se que, seguindo recomendações do USACE (2016), de maneira empírica, adotou-se um tamanho de célula considerada adequada para representar as mudanças de relevo, mudanças de coeficientes de rugosidade e orientação correta do escoamento.

Além disto, utilizou-se a ferramenta *breaklines* para desenhar o canal fluvial e assim, assegurar que não haja passagem de água para as planícies de inundação até que o nível da água tenha atingido uma elevação maior do que as faces celulares que estão alinhadas com as margens.

A Figura 15, a seguir, apresenta a malha de escoamento bidimensional e a Figura 16 detalha o alinhamento das células na região das margens do rio.

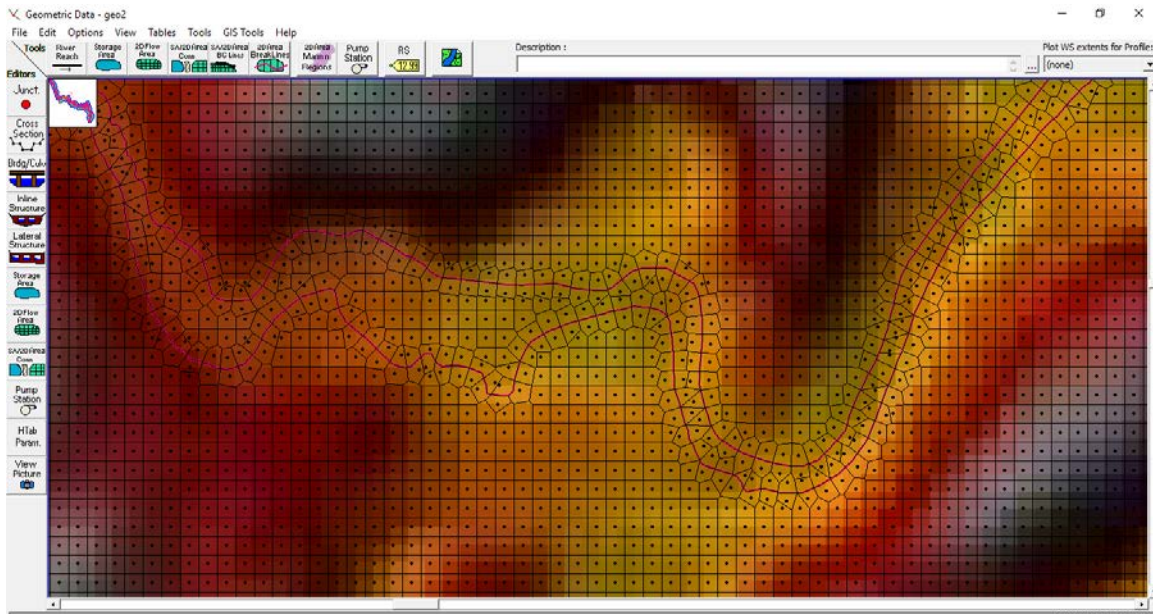
**Figura 15** – Malha de escoamento bidimensional com células de 20mx20m



Fonte: Própria autora.



**Figura 16** – Alinhamento das células com as margens do rio para melhor representatividade do relevo

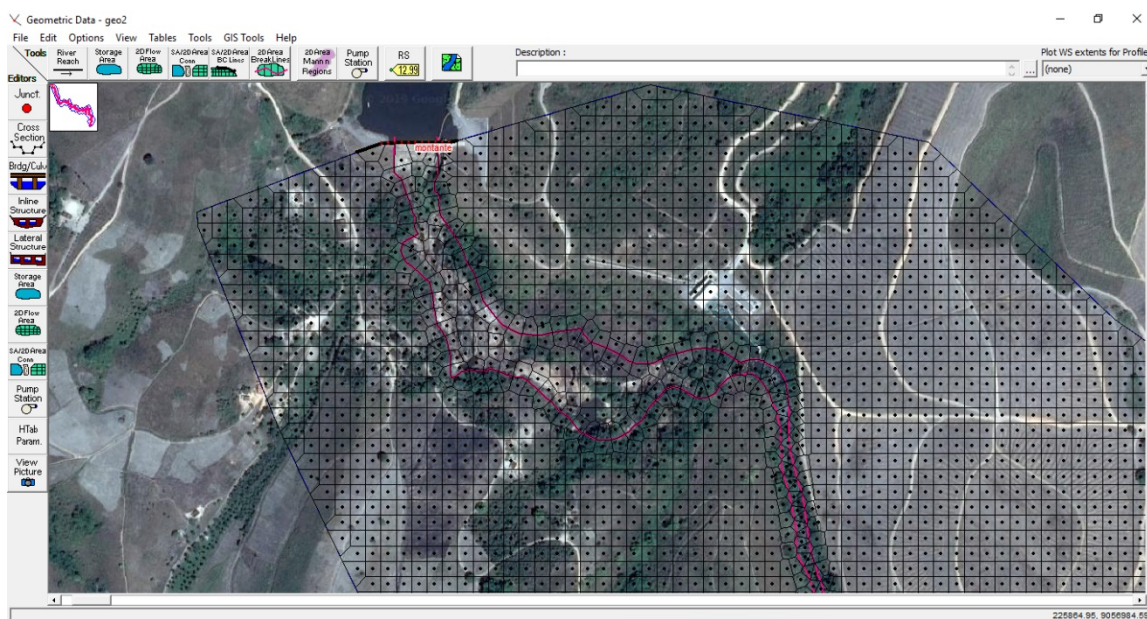


Fonte: Própria autora.

#### 4.5.2.3 *Inserção das seções de montante e jusante*

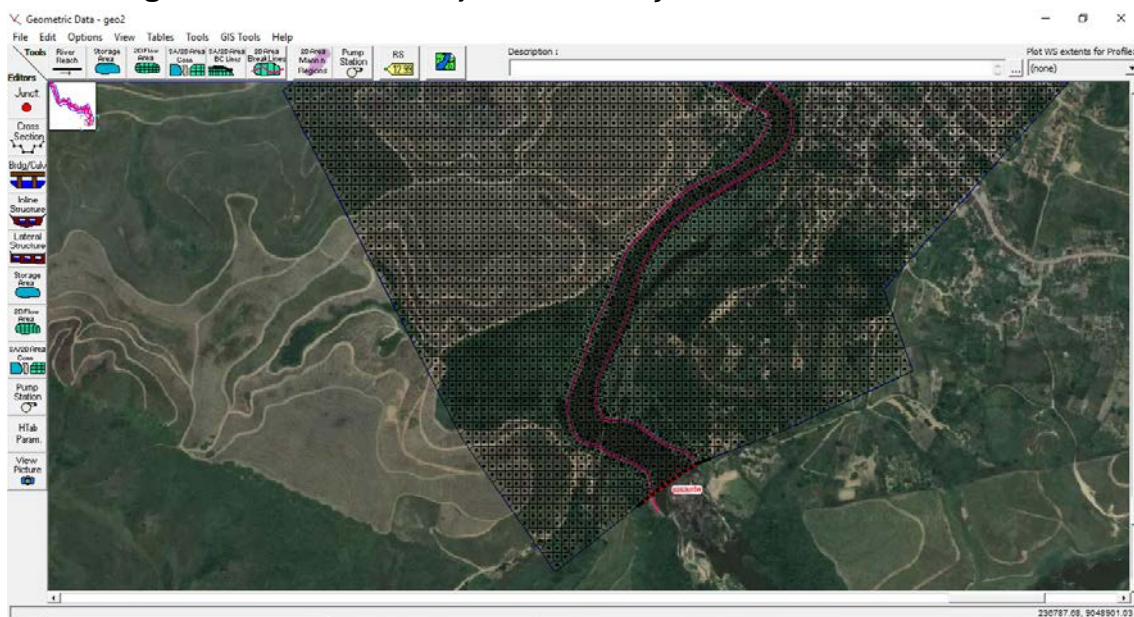
Nesta etapa, foram inseridas as linhas (*Boundary Conditions Lines*) referentes as seções de montante (entrada de fluxo), Figura 17, e jusante (saída de fluxo), Figura 18, para inserção das condições de contorno sendo elas, respectivamente, os hidrogramas dos diferentes cenários e a declividade do canal.

**Figura 17 – BC Line de montante sobre o vertedouro da PCH Pedra Furada**



Fonte: Própria autora.

**Figura 18 – BC Line de jusante na seção final da área de estudo**



Fonte: Própria autora.

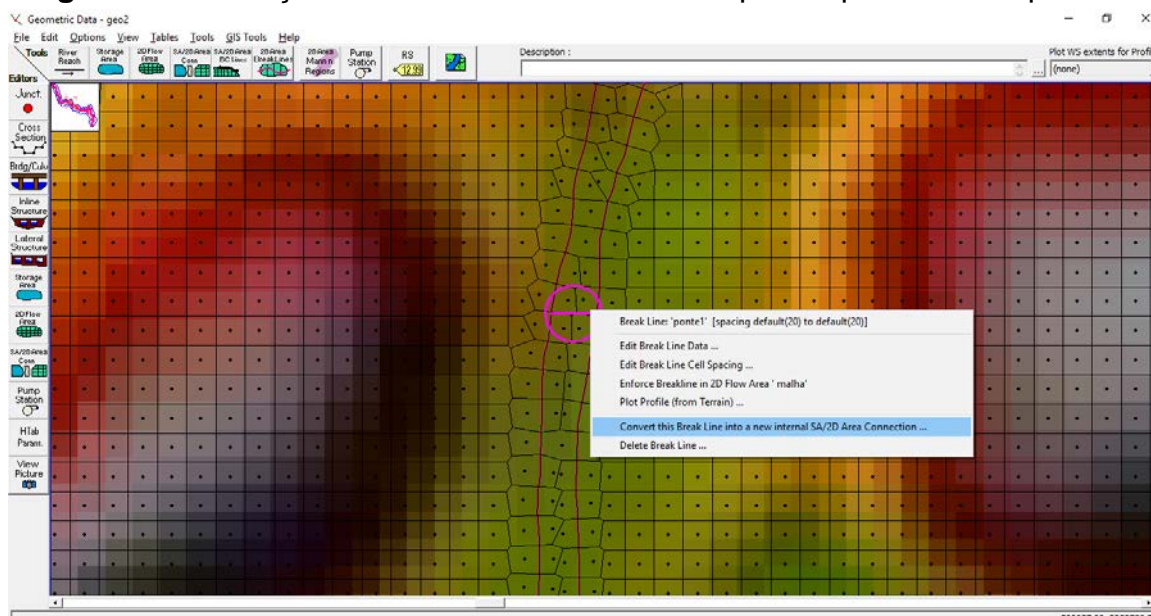
#### 4.5.2.4 *Inserção das pontes*

Ao longo do trecho de estudo, foram identificadas cinco pontes. O modelo de escoamento bidimensional do HEC-RAS não possui, até o presente momento, uma ferramenta específica para inserção destas estruturas.

Para as análises principais de escoamento em APPs estas estruturas não foram consideradas na geometria. No entanto, para fins de elucidação de uma maneira alternativa para inserção de pontes no modelo, caso seja necessário detalhar o comportamento do fluxo nestas seções, desenvolveu-se uma simulação adicional onde as pontes foram inseridas como portões ou comportas (*gates*).

Para a inserção das pontes então, desenhou-se uma linha de maneira transversal ao rio com auxílio da ferramenta *breaklines* e, na sequência, converteu-se esta linha em uma conexão interna de fluxo (*Internal Connection*), vide Figura 19.

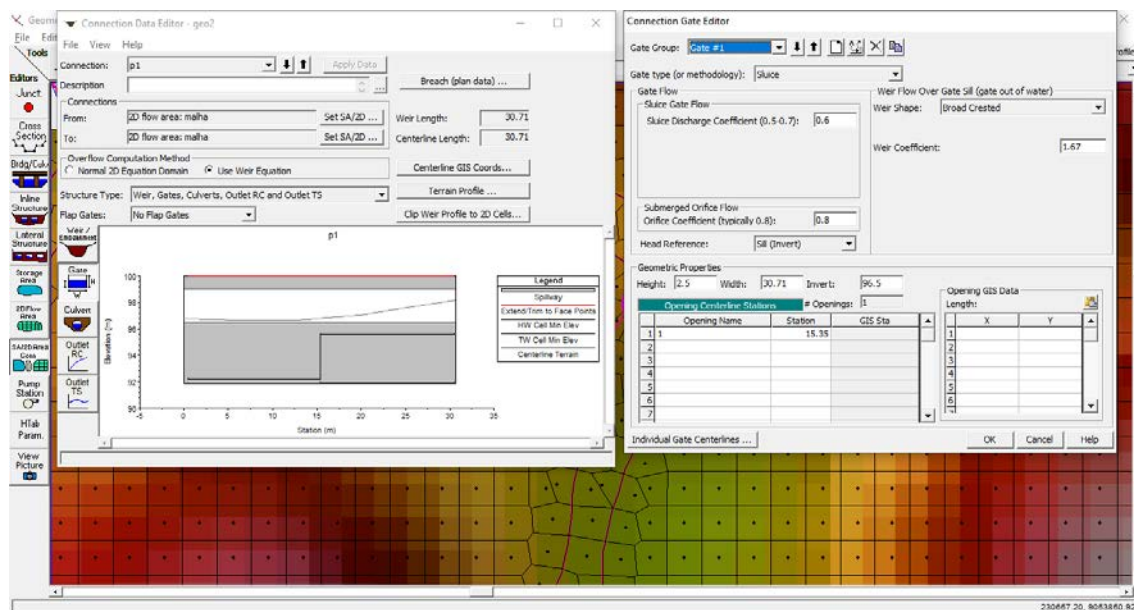
**Figura 19** – Inserção de conexão interna de fluxo para representar as pontes



Fonte: Própria autora.

Na janela de edição de conexões, utilizou-se a ferramenta de construção de portões (*gates*) para representar o tabuleiro das pontes, considerando a estrutura do tipo “*sluice*” (ou guilhotina), conforme apresentado pela Figura 20, a seguir.

**Figura 20** – Ferramenta de edição de conexões internas



Fonte: Própria autora.

Sendo que:

- Sluice discharge coefficient: coeficiente de descarga da abertura (adotou-se a média de valores sugerida pelo desenvolvedor do software).
- Height: altura da abertura (representando o espaço entre o tabuleiro da ponte e o leito do rio);
- Width: largura da abertura (representando o comprimento da ponte);
- Invert: cota inferior da abertura (utilizou-se a cota mais baixa do leito na seção).

#### 4.5.2.5 ***Inserção dos coeficientes de Manning***

Os coeficientes de rugosidade (Manning) foram determinados de acordo com as classes definidas pela atividade de classificação da cobertura do solo da área de estudo.

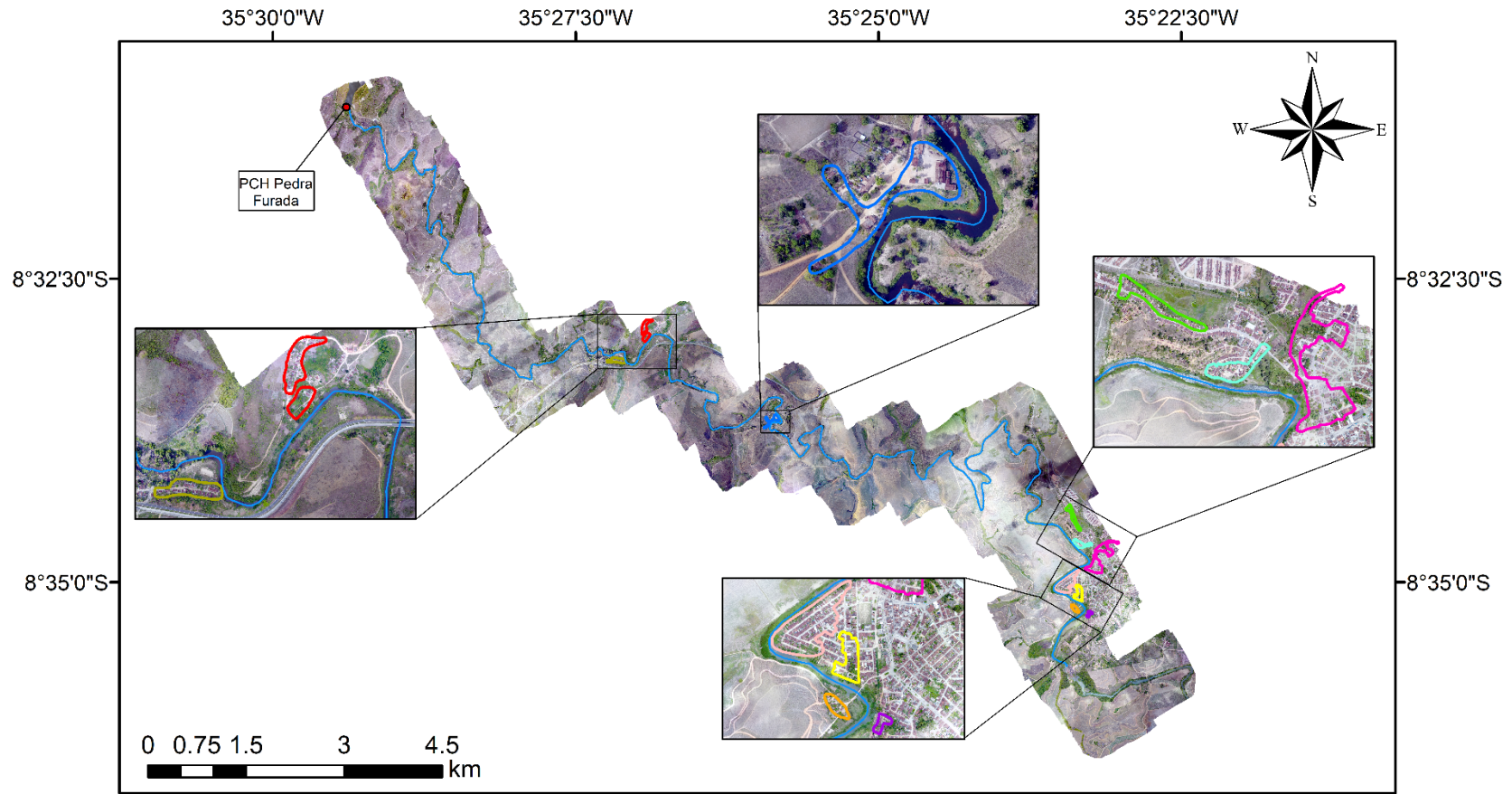
A partir de duas pesquisas desenvolvidas em 2013 e 2018 pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM intituladas “Setorização de áreas em alto e muito alto risco a movimentos de massa, enchentes e inundações: Gameleira, Pernambuco”, foi possível delimitar regiões deste município que foram atingidas

pelas cheias naturais excepcionais ocorridas no estado nos anos de 2010 e 2017.

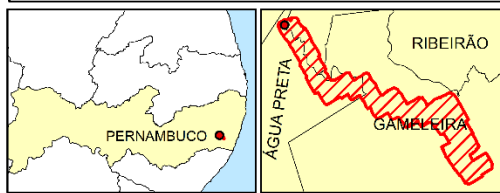
Para a elaboração das referidas pesquisas, a equipe da CPRM realizou visitas presenciais às residências atingidas nos eventos ocorridos nos meses de junho de 2010 e maio de 2017, catalogando o registro das marcas atingidas pelas inundações provenientes do rio Sirinhaém.

Na Figura 21, a seguir, apresentam-se os setores do município de Gameleira – PE catalogados como suscetíveis a inundações.

**Figura 21 – Setores do município de Gameleira atingidos pelas cheias de 2010 e 2017**



**Mapa de Localização da Área de Estudo**



**Legenda**

- Barragem da PCH Pedra Furada
- Rio Sirinhaém (Trecho de Estudo)
- ▭ Área de Estudo
- ▭ Municípios
- Setorização de Áreas de Risco à Inundações**
- ▭ Av. José Mariano
- ▭ Av. Pedro Francisco Gomes e R. José Antônio dos Santos
- ▭ Engenho Pacas
- ▭ R. Manoel Buarque Lins e R. Tiradentes
- ▭ R. da Ponte
- ▭ R. da Praia
- ▭ R. Francisco Neves, Arlindo Sobrinho e Antonio Soares
- ▭ Vila da Ponte
- ▭ Povoado Alegre 1
- ▭ Povoado Alegre 2

Datum WGS 1984/Projeção UTM Zona 25S  
 Setorização da área: CPRM (2018)  
 Elaborado por Ludmilla Freitas Pereira (2019)

Fonte: CPRM (2018). Adaptado pela autora.

Embora tenha sido feito um levantamento das marcas do nível água em diversas residências, não há estimativas da CPRM ou de pesquisas públicas para a vazão extrema do rio Sirinhaém durante as cheias de 2010 e 2017.

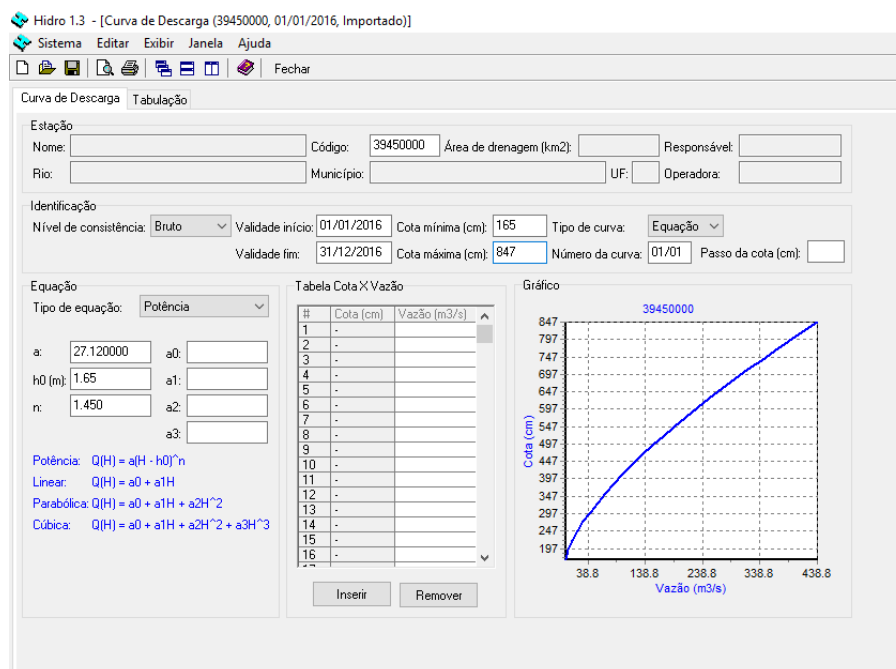
Como a maioria dos postos fluviométricos e estações telemétricas localizados nos cursos hídricos da região foram danificados ou não efetuaram leituras durante estas cheias, realizou-se uma projeção das vazões ocorridas no rio Sirinhaém e no rio Amaragi (um dos principais afluentes do rio Sirinhaém e que está localizado logo a montante do município de Gameleira) por meio das curvas-chaves das estações Engenho Bento e José Mariano.

As curvas-chaves assim como as fichas de campo contendo as leituras das réguas limnimétricas instaladas no local das estações fluviométricas foram obtidas por meio da plataforma Hidroweb da ANA.

A leitura da régua limnimétrica para a estação Engenho Bento, no dia 18 de junho de 2010, foi de 8,47 m, enquanto para o posto José Mariano, 8,64 m. As fichas de campo com as leituras do mês de junho de 2010 para ambas as estações estão apresentadas nos Apêndices 2 e 3 do presente trabalho.

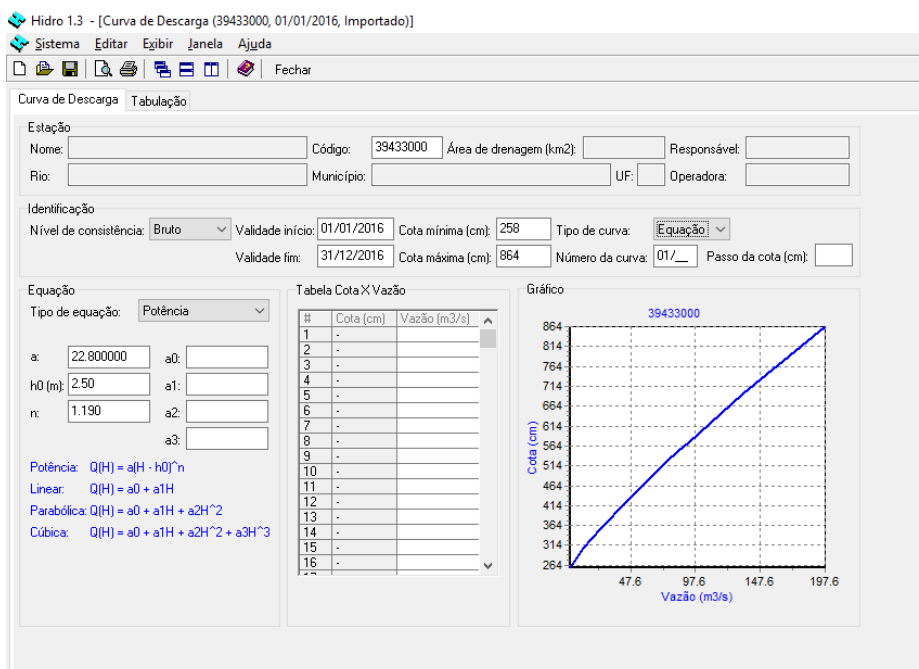
Aplicando-se estes valores de leituras nas curvas-chave mais recentes de cada estação obtiveram-se os respectivos valores de vazões neste evento hidrológico, conforme Figuras 22 (Engenho Bento – rio Sirinhaém) e 23 (José Mariano – rio Amaragi).

**Figura 22** – Curva de descarga do posto fluviométrico Engenho Bento no rio Sirinhaém



Fonte: ANA (2019).

**Figura 23** – Curva de descarga do posto fluviométrico José Mariano no rio Amaragi



Fonte: ANA (2019).

Realizou-se um ajuste de proporcionalidade (regionalização de vazões) devido à diferença de áreas de drenagens dos postos com os respectivos pontos



de interesse (barragem e foz do rio Amaragi), obtendo-se então, uma vazão de 447 m<sup>3</sup>/s no local da PCH Pedra Furada e de 318 m<sup>3</sup>/s na foz do rio Amaragi (que desemboca a montante de Gameleira).

Desta forma, fizeram-se testes de coeficientes de rugosidades, com o uso do HEC-RAS, por meio do modelo de escoamento não-permanente bidimensional, utilizando-se as vazões extrapoladas pelas curvas-chave e visando obter os valores de altura da lâmina d'água nos setores catalogados pela CPRM.

As casas presentes em cada setor foram marcadas, com auxílio do software ArcGis, e os valores máximos de altura da lâmina d'água foram extraídos de cada mancha de inundação resultante do processo de calibração. Ressalta-se que não se sabe precisamente em quais casas foram observadas as marcas d'água históricas catalogadas pelo CPRM.

Percebendo-se que a variação do coeficiente de rugosidade da calha do rio afetava os setores sujeitos à inundação de maneira divergente, seccionou-se a calha do rio em três regiões e, para cada uma delas, foi atribuído um valor.

Dentre as simulações realizadas variando-se cada coeficiente de rugosidade individualmente, adotou-se como situação real da área de estudo o teste que apresentou melhor relação entre os valores de altura de água observados e simulados.

No Quadro 18, a seguir, apresentam-se os níveis máximos de água observados pela equipe de campo da CPRM, nas enchentes de 2010, e os níveis máximos de água simulados pelo presente estudo.

**Quadro 18** – Comparativo entre vazões observadas e simuladas

Setor	Altura máx. (m) da água observada (CPRM)	Altura máx. da água simulada (m)	$\Delta_h$ (m)
Setor 17: Bairro Santa Luzia – Ruas Manoel Buarque e Tiradentes	2,50	2,00	-0,50
Setor 18: Bairro da Lama Avenida José Mariano	0,70	Não atingiu	-0,70
Setor 20: Centro – Ruas Francisco Neves, Arlindo Sobrinho e Antônio Soares	1,70	2,32	0,52
Setor 22: Bairro Nova Gameleira – Rua da Ponte	1,50	0,85	-0,65
Setor 25: Povoado Alegre 1	1,20	1,72	0,52
Setor 26: Povoado Alegre 2	1,80	2,26	0,46
Setor 27: Engenho Pacas	1,90	1,90	0,00

Fonte: Própria autora.

Nota-se que para os setores analisados, houveram diferenças entre alturas simuladas e observadas da ordem de 40 a 70 centímetros. Sugerindo-se, portanto, uma baixa precisão da estimativa da vazão de cheia por meio das curvas-chaves, um erro de leitura das réguas ou, ainda, uma falha no levantamento topográfico realizado.

A calibração dos coeficientes de rugosidade, geralmente, é realizada utilizando-se a modelagem unidimensional no HEC-RAS – Cestari Junior (2013), Dos Santos (2013) - diferentemente do que se propôs a presente calibração, que utilizou a modelagem de escoamento bidimensional não-permanente, com vistas a representar a situação mais verídica possível, principalmente nas planícies de inundação.

Outros setores de risco mencionados nas pesquisas da CPRM cuja descrição não apresentava estimativas de profundidade da água, fotos de marca d'água ou que vivenciam problemáticas de inundações relacionadas à drenagem pluvial urbana, foram desconsiderados para efeito da calibração deste estudo.

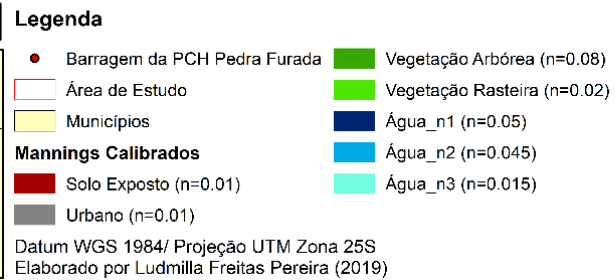
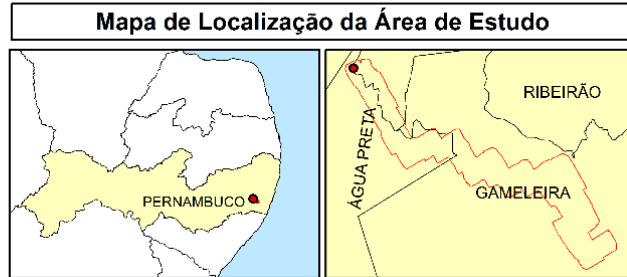
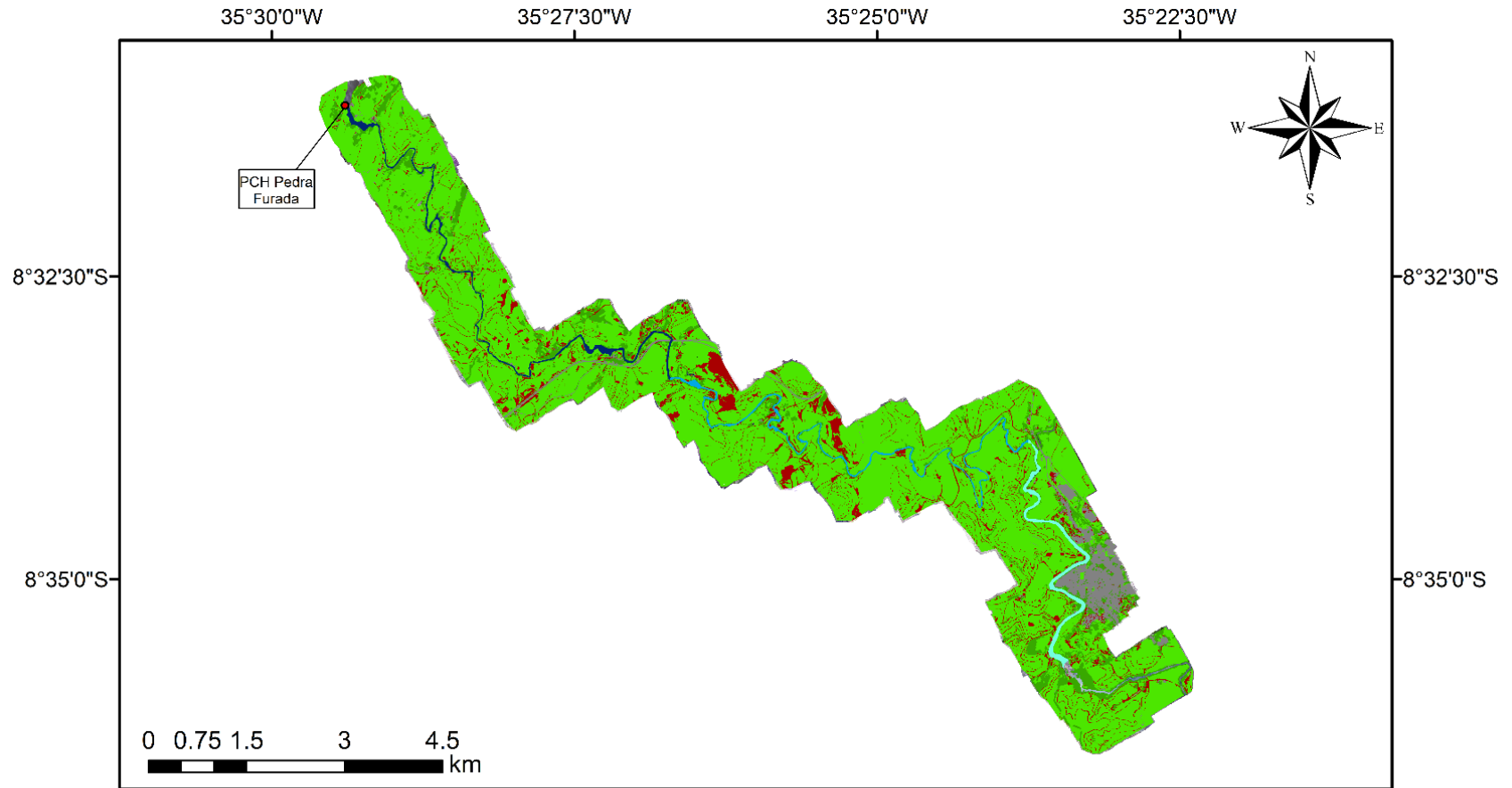
Assim, para efeitos de consideração do cenário real dos coeficientes de rugosidade, foram adotados os valores apresentados no Quadro 19 e na Figura 24.

**Quadro 19 – Coeficientes de rugosidade calibrados**

<b>Classe</b>	<b>Coeficiente de Rugosidade</b>
Rio (trecho 1)	0,050
Rio (trecho 2)	0,045
Rio (trecho 3)	0,015
Vegetação Arbórea	0,080
Vegetação Rasteira	0,020
Solo Exposto	0,010
Urbano	0,010

Fonte: Própria autora.

**Figura 24 – Espacialização dos coeficientes de Manning calibrados**



Fonte: Própria autora

Adicionalmente, para efeito de comparação e discussão de resultados, desenvolveu-se uma modelagem hidrodinâmica baseada em coeficientes de rugosidade médios extraídos da literatura (conforme item 3.5.1). Estes valores estão apresentados no Quadro 20.

**Quadro 20** – Coeficientes de rugosidade baseados na literatura

<b>Classe</b>	<b>Coeficiente de Rugosidade</b>	<b>Referência/Justificativa</b>
Rio	0,035	Valor para rio típico – Kanashiro
Vegetação Arbórea	0,10	Valor médio para planícies densamente vegetadas e/ou com florestas – Viseu, Kanashiro e Chow
Vegetação Rasteira	0,050	Valor médio para planícies com pastos, pastagens e/ou áreas de cultivo – Viseu, Kanashiro e Chow
Solo Exposto	0,020	Valor médio para canais em terra (limpo e uniforme) – Eletrobras, Porto e Chow
Urbano	0,060	Zona urbana – Viseu

Fonte: Própria autora.

#### 4.5.3 Definição do tempo computacional

Uma vez definida uma malha de escoamento com resolução adequada, partiu-se para a escolha do tempo computacional de cálculo. Este parâmetro foi obtido por meio de testes, onde foram realizadas múltiplas simulações até o momento em que não foram observados sinais de instabilidade no software.

Adotou-se, portanto, um tempo computacional de 12 segundos.

#### 4.5.4 Definição dos Dados de Escoamento

O regime de escoamento adotado na simulação da propagação das ondas de inundação pelo vale a jusante da PCH Pedra Furada é o regime não-permanente, por permitir identificar, em cada uma das seções do rio, os tempos

de chegada da frente da onda, além dos níveis d'água nesses instantes críticos de inundação.

Nessas condições, foram utilizadas duas condições de contorno para o desenvolvimento das simulações, sendo uma condição a montante, localizada na seção da barragem, e uma condição a jusante localizada no final do trecho simulado (item 4.5.2.3).

#### **4.5.4.1 Montante**

Como condição de contorno a montante da malha de escoamento, foram adotados dois cenários de vazões no trecho de estudo do rio Sirinhaém. O primeiro cenário refere-se à simulação de uma vazão constante partindo do vertedouro da PCH equivalente ao tempo de retorno de 10 anos (248 m<sup>3</sup>/s) e no segundo cenário, um tempo de retorno de 10.000 anos (662 m<sup>3</sup>/s).

Como condição de afluência do rio Amaragi, como o foco do trabalho é o trecho do rio Sirinhaém a jusante da PCH, manteve-se constante o escoamento da vazão média histórica igual a 12 m<sup>3</sup>/s.

#### **4.5.4.2 Jusante**

Como condição de contorno a jusante (seção final em direção à qual o fluxo escoar) foi utilizada a declividade do rio no trecho de estudo, com o valor médio de 0,0035.

#### **4.5.5 Definição dos cenários de simulação**

São elencados, no Quadro 21 a seguir, os cenários de simulação realizados:

**Quadro 21 – Cenários de modelagens hidrodinâmicas**

Cenário	Tamanho da célula da malha	Tempo de cálculo	Coefficientes de Manning	Condição da cobertura do solo	Pontes inseridas no modelo?	Vazão Defluente
1	20 x 20 m	12 s	Calibrados	Real	Não	TR 10 anos
2	20 x 20 m	12 s	Calibrados	Real	Não	TR 10.000 anos
3	20 x 20 m	12 s	Teóricos	Real	Não	TR 10 anos
4	20 x 20 m	12 s	Teóricos	Real	Não	TR 10.000 anos
5	20 x 20 m	12 s	Calibrados	Real	Sim	TR 10 anos
6	20 x 20 m	12 s	Calibrados	Real	Sim	TR 10.000 anos
7	20 x 20 m	12 s	Calibrados	APP inteiramente coberta por vegetação arbórea	Não	TR 10 anos
8	20 x 20 m	12 s	Calibrados	APP inteiramente coberta por vegetação arbórea	Não	TR 10.000 anos
9	20 x 20 m	12 s	Calibrados	APP inteiramente coberta por vegetação rasteira	Não	TR 10 anos
10	20 x 20 m	12 s	Calibrados	APP inteiramente coberta por vegetação rasteira	Não	TR 10.000 anos
11	20 x 20 m	12 s	Calibrados	APP inteiramente coberta por solo exposto ou área urbana	Não	TR 10 anos
12	20 x 20 m	12 s	Calibrados	APP inteiramente coberta por solo exposto ou área urbana	Não	TR 10.000 anos

Fonte: Própria autora.

#### 4.5.6 Exportação dos resultados

Após as simulações dos cenários de análise, foram exportadas as manchas de inundação a partir do RAS Mapper, bem como informações como: tempos de chegada de onda, limites máximos de inundação e elevação do nível d'água.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 COEFICIENTES DE RUGOSIDADE CALIBRADOS E TEÓRICOS

As Figuras 25 e 26 a seguir, apresentam os mapas de inundação referentes às simulações em que foram utilizados os coeficientes de rugosidade calibrados, sem a inserção de pontes (Cenários 1 e 2). Enquanto as Figura 27 e 28, apresentam os mapas resultantes da simulação baseada em coeficientes teóricos (Cenários 3 e 4).

Em termos de uma análise comparativa da área total alagada, obtiveram-se os resultados apresentados no Quadro 22 e nas Figuras 29 e 30, a seguir.

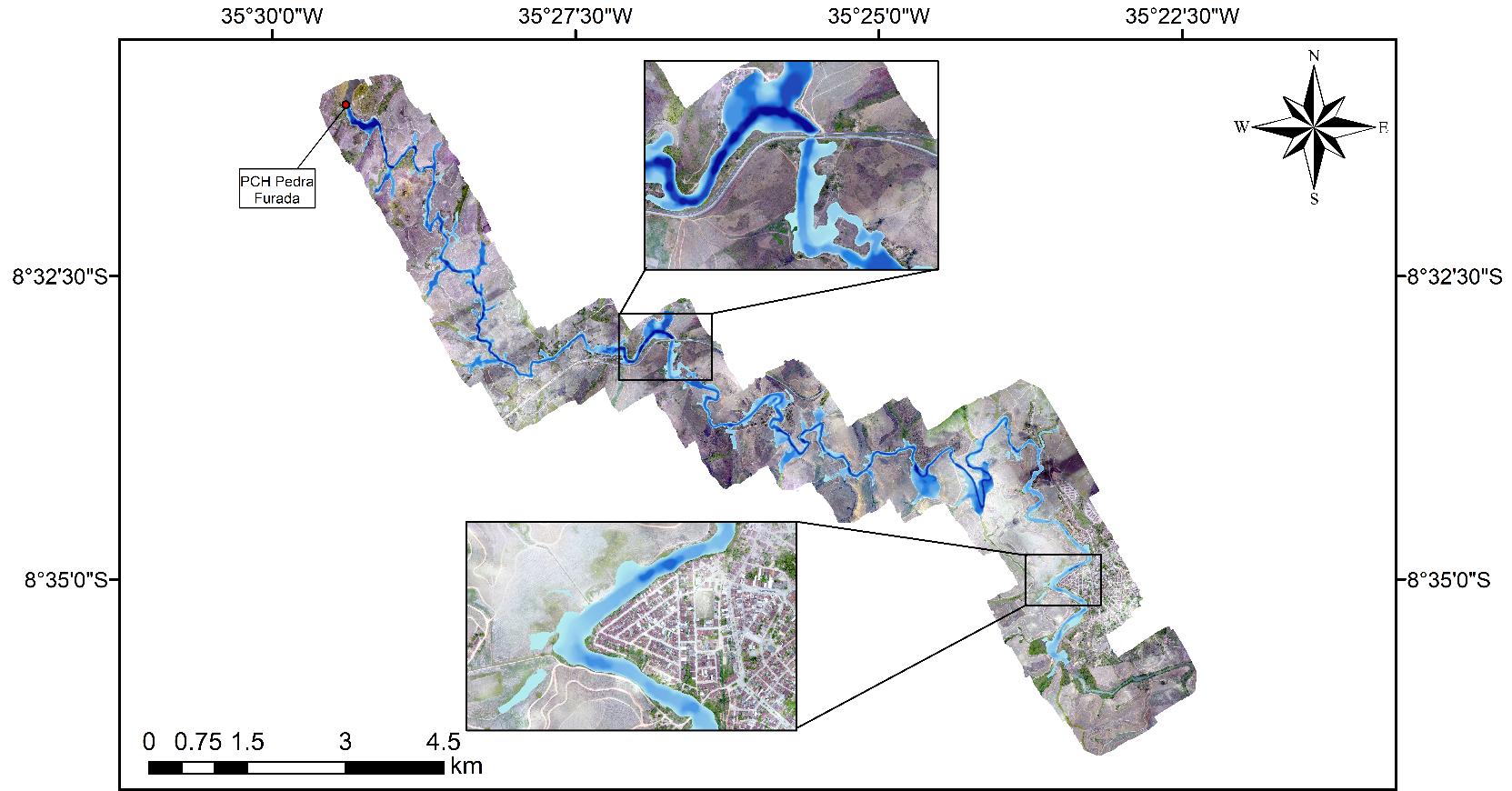
**Quadro 22** – Comparação entre as áreas alagadas pelas simulações com coeficientes teóricos e calibrados

	TR = 10 anos Coeficientes Calibrados	TR = 10 anos Coeficientes Teóricos	TR = 10.000 anos Coeficientes Calibrados	TR = 10.000 anos Coeficientes Teóricos
<b>Área máxima alagada</b>	3,19 km <sup>2</sup>	3,49 km <sup>2</sup>	4, 53 km <sup>2</sup>	5,06 km <sup>2</sup>
<b>Altura máxima atingida</b>	16,78 m	16,94 m	23,02 m	23,28 m

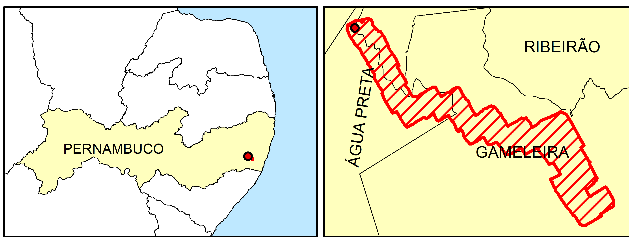
Fonte: Própria autora.



**Figura 25 – Mapa de inundação para um TR = 10 anos utilizando-se coeficientes calibrados**



**Mapa de Localização da Área de Estudo**



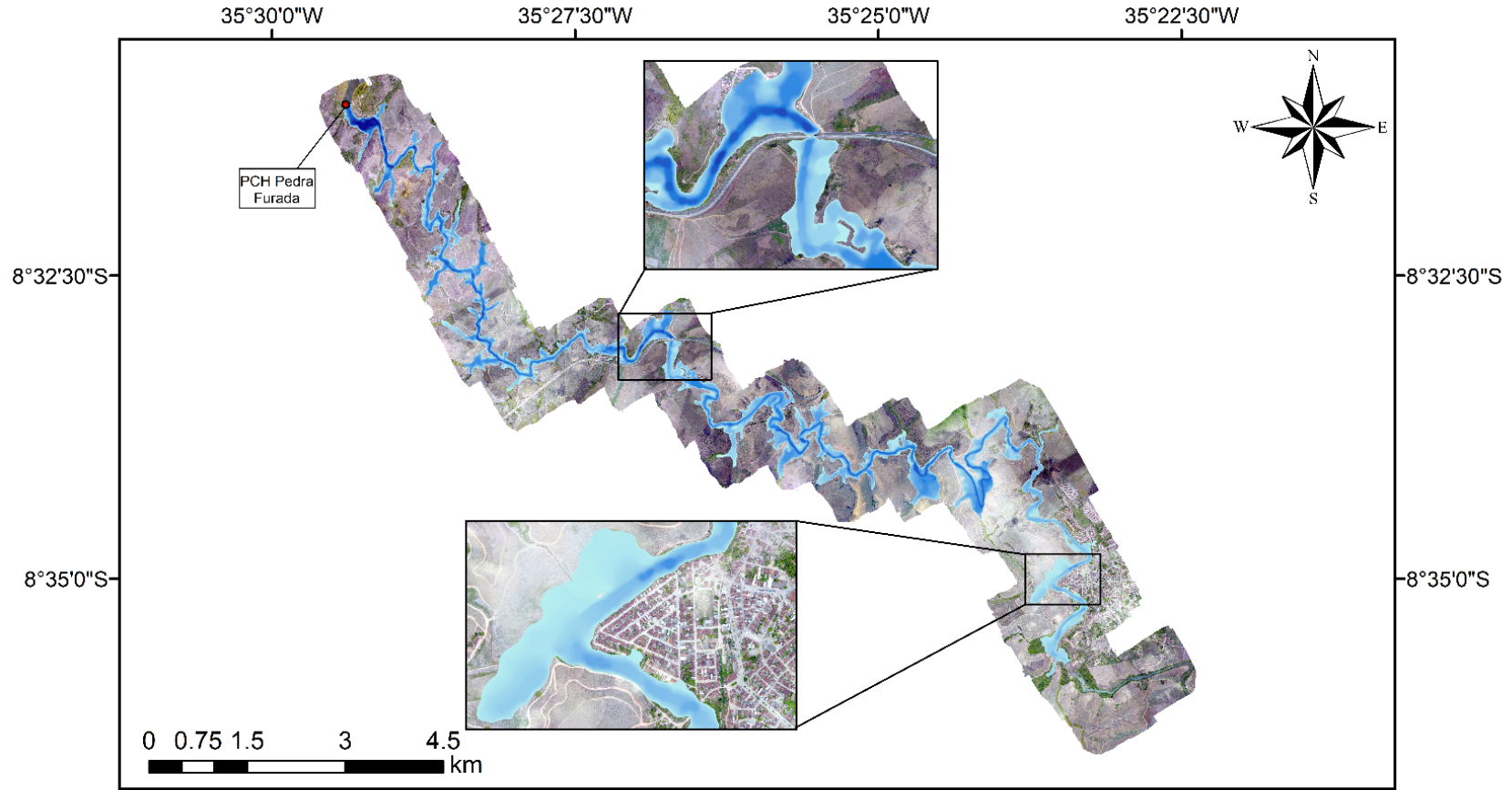
**Legenda**

- Barragem da PCH Pedra Furada
- Mancha de Inundação - TR 10 anos (Manning Calibrado)
- Profundidade (m)
  - Max : 16.7865
  - Min : 0.000999451
- Municípios
- ▨ Área de Estudo

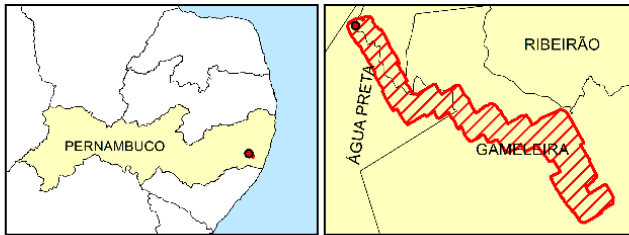
Datum WGS 1984/ Projeção UTM Zona 25S  
 Data do levantamento com VANT: jan/2017  
 Elaborado por Ludmilla Freitas Pereira (2019)

Fonte: Própria autora

**Figura 26 – Mapa de inundação para um TR = 10.000 anos utilizando-se coeficientes calibrados**



**Mapa de Localização da Área de Estudo**



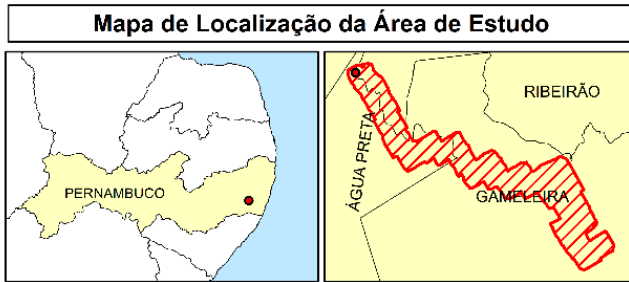
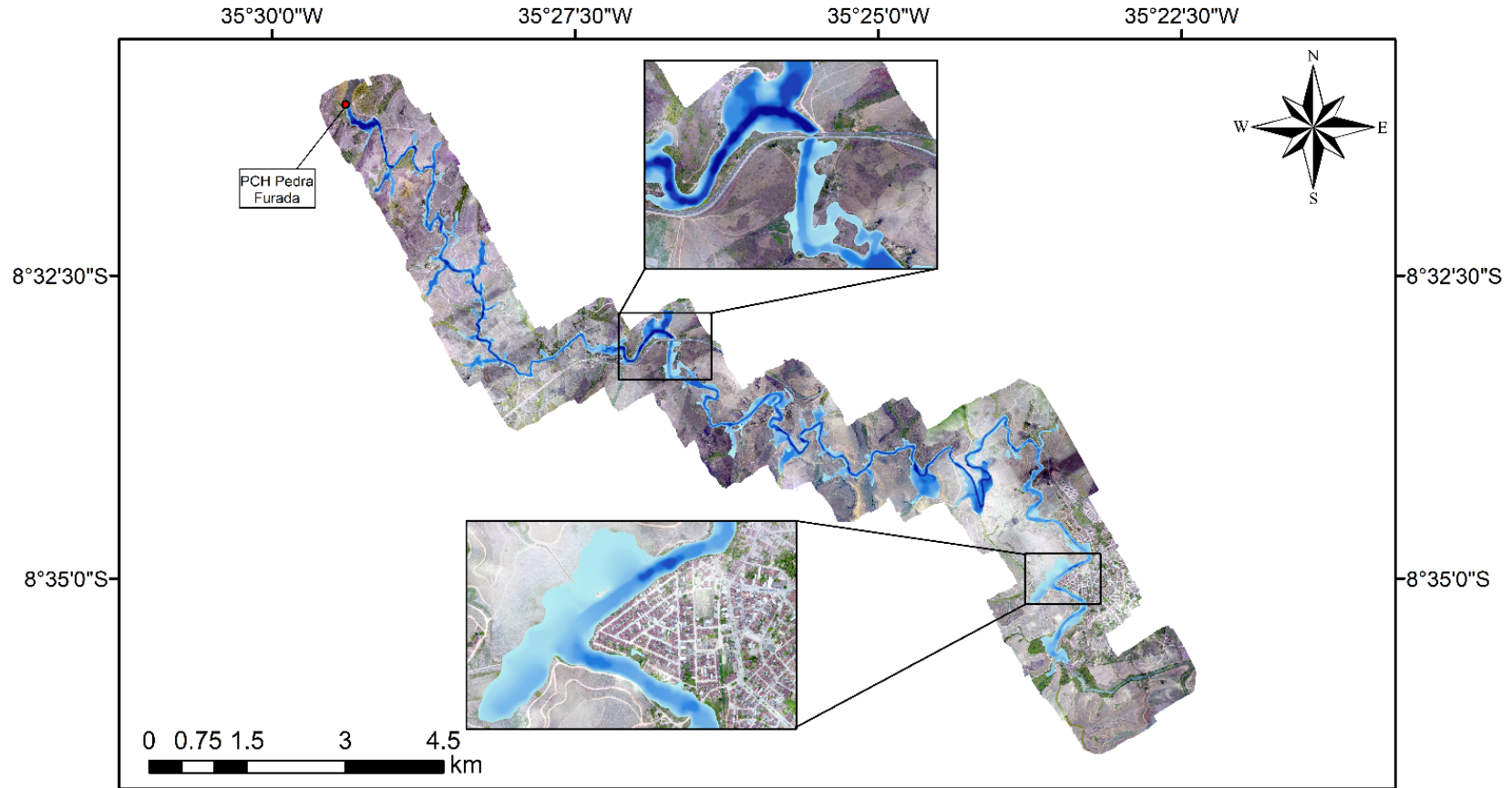
**Legenda**

- Barragem da PCH Pedra Furada
- Mancha de Inundação - TR 10.000 anos (Manning Calibrado)
- Profundidade (m)
  - Máx : 23.0194
  - Min : 0.000999451
- Municípios
- ▨ Área de Estudo

Datum WGS 1984/ Projeção UTM Zona 25S  
 Data do levantamento com VANT: jan/2017  
 Elaborado por Ludmilla Freitas Pereira (2019)

Fonte: Própria autora

**Figura 27 – Mapa de inundação para uma TR = 10 anos utilizando-se coeficientes teóricos**



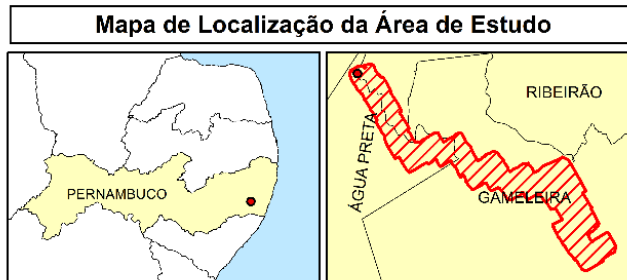
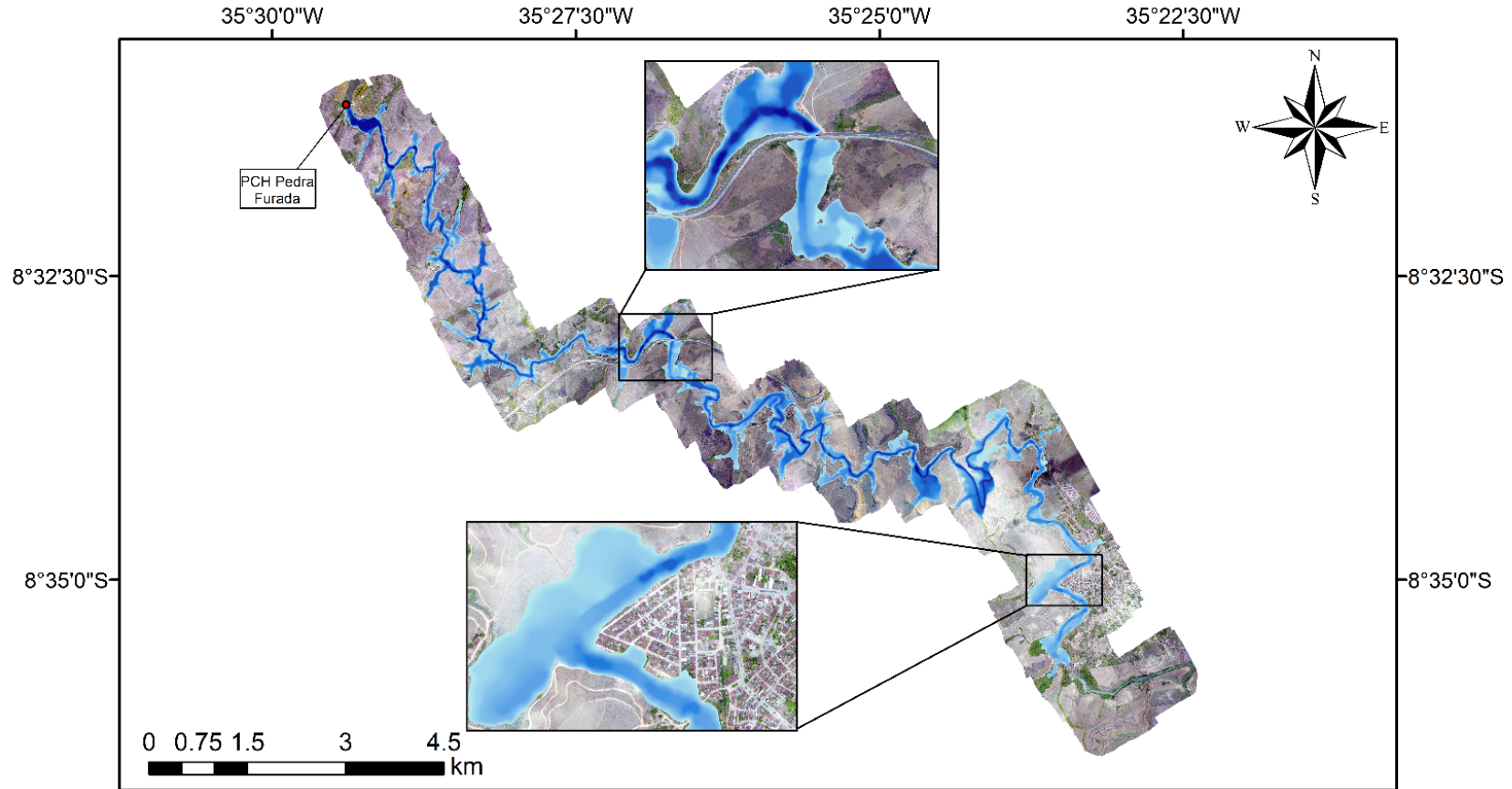
**Legenda**

- Barragem da PCH Pedra Furada
- Mancha de Inundação - 10 anos (Manning Teórico)
- Profundidade (m)
  - Max : 16.9434
  - Mín: 0.000999451
- Municípios
- Área de Estudo

Datum WGS 1984/ Projeção UTM Zona 25S  
 Data do levantamento com VANT: jan/2017  
 Elaborado por Ludmilla Freitas Pereira (2019)

Fonte: Própria autora

**Figura 28** – Mapa de inundação para uma TR = 10.000 anos utilizando-se coeficientes teóricos



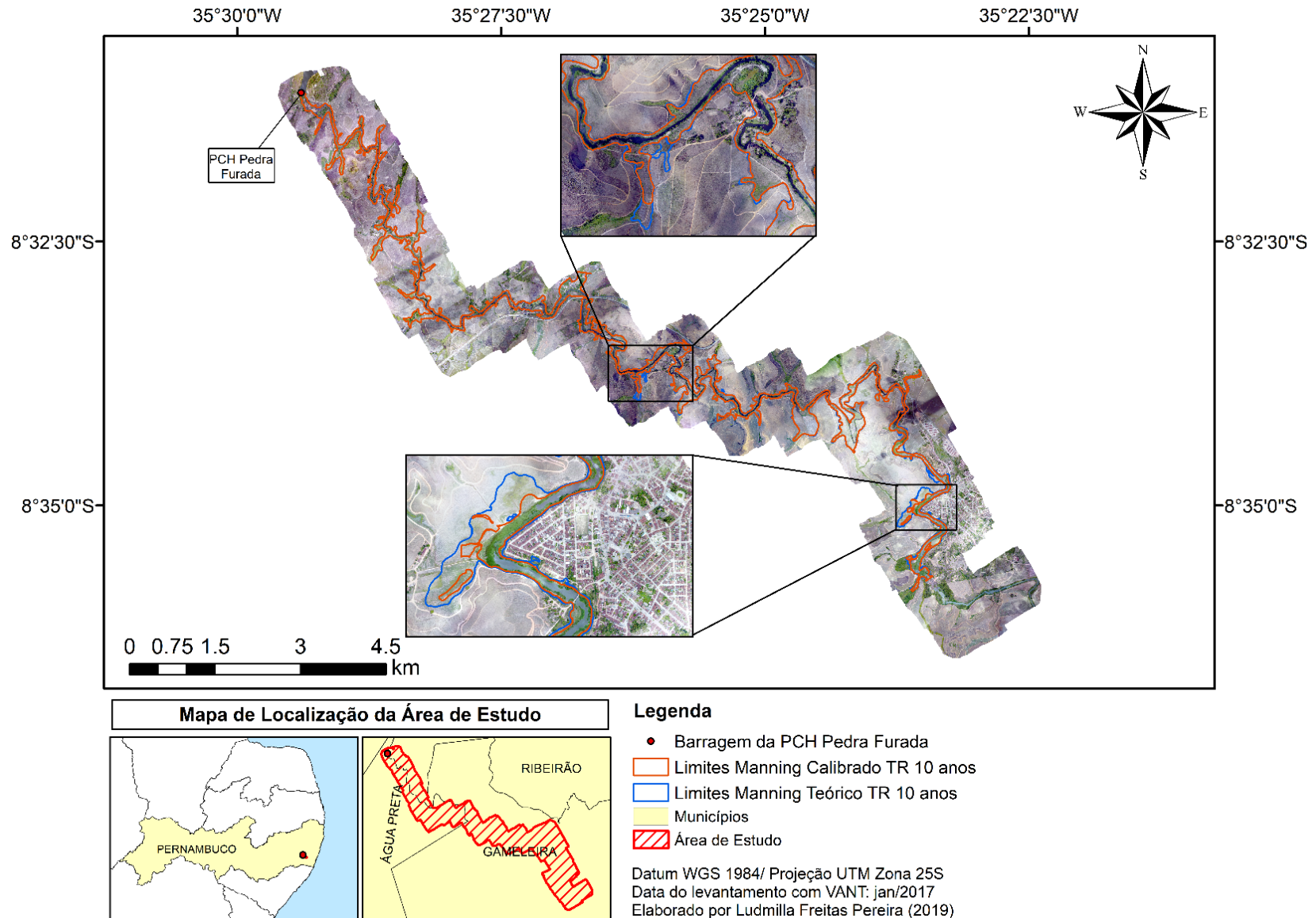
**Legenda**

- Barragem da PCH Pedra Furada
- Mancha de Inundação - TR 10.000 anos (Manning Teórico)
- Profundidade (m)
  - Máx : 23.2833
  - Mín : 0.000999451
- Municípios
- ▨ Área de Estudo

Datum WGS 1984/ Projeção UTM Zona 25S  
 Data do levantamento com VANT: jan/2017  
 Elaborado por Ludmilla Freitas Pereira (2019)

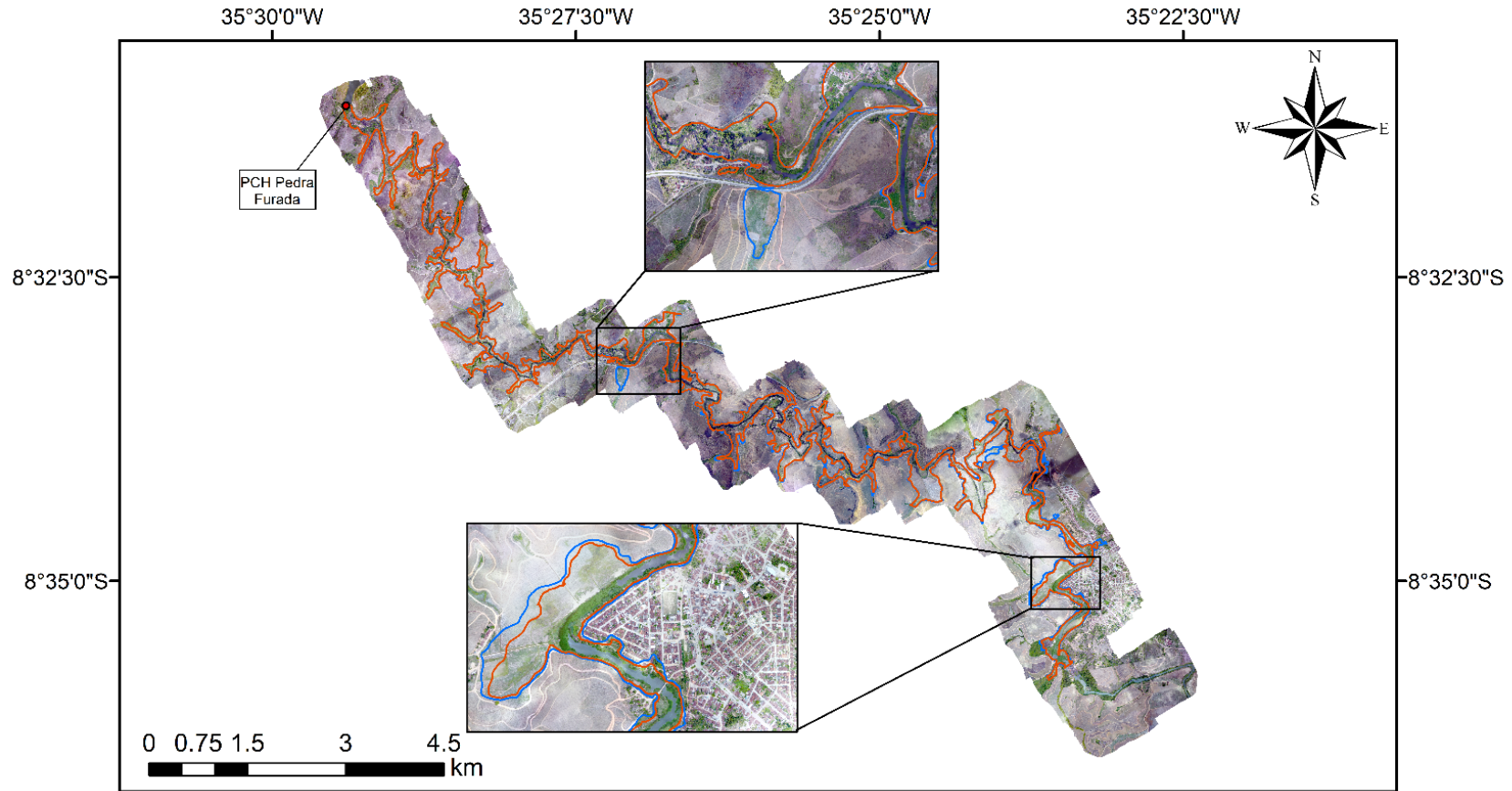
Fonte: Própria autora

**Figura 29** – Comparativo entre a área alagada pelo TR=10 anos com coeficientes teóricos e calibrados

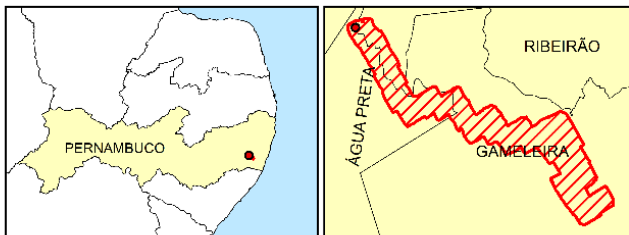


Fonte: Própria autora

**Figura 30** – Comparativo entre a área alagada pelo TR=10.000 anos com coeficientes teóricos e calibrados



**Mapa de Localização da Área de Estudo**



**Legenda**

- Barragem da PCH Pedra Furada
- ▭ Limites Manning Calibrado TR 10.000 anos
- ▭ Limites Manning Teórico TR 10.000 anos
- ▭ Municípios
- ▨ Área de Estudo

Datum WGS 1984/ Projeção UTM Zona 25S  
 Data do levantamento com VANT: jan/2017  
 Elaborado por Ludmilla Freitas Pereira (2019)

Fonte: Própria autora

Analisando-se o cenário de escoamento de maior vazão constante, obteve-se uma diferença de 0,53 km<sup>2</sup> de área total alagada, enquanto a diferença de alturas máximas atingidas foi de 26 centímetros.

Já para o cenário de escoamento de menor vazão constante, obteve-se uma diferença de 0,30 km<sup>2</sup> de área total alagada, enquanto a diferença de alturas máximas atingidas foi de 16 centímetros.

Portanto, nota-se que a variação dos coeficientes de rugosidade não impacta com tanta significância os valores de área alagada ou profundidades máximas atingidas para ambos cenários de escoamento.

Assim, frente à aproximação da extensão espacial de alague entre os modelos baseado na calibração e baseado em valores teóricos, julgou-se coerente adotar o primeiro como referência para as demais análises.

## 5.2 PONTES INSERIDAS NO MODELO

As Figuras 31 e 32 a seguir, apresentam os mapas de inundação referentes às simulações em que foram utilizados os coeficientes de rugosidade calibrados com a inserção de pontes na geometria do modelo (Cenários 5 e 6).

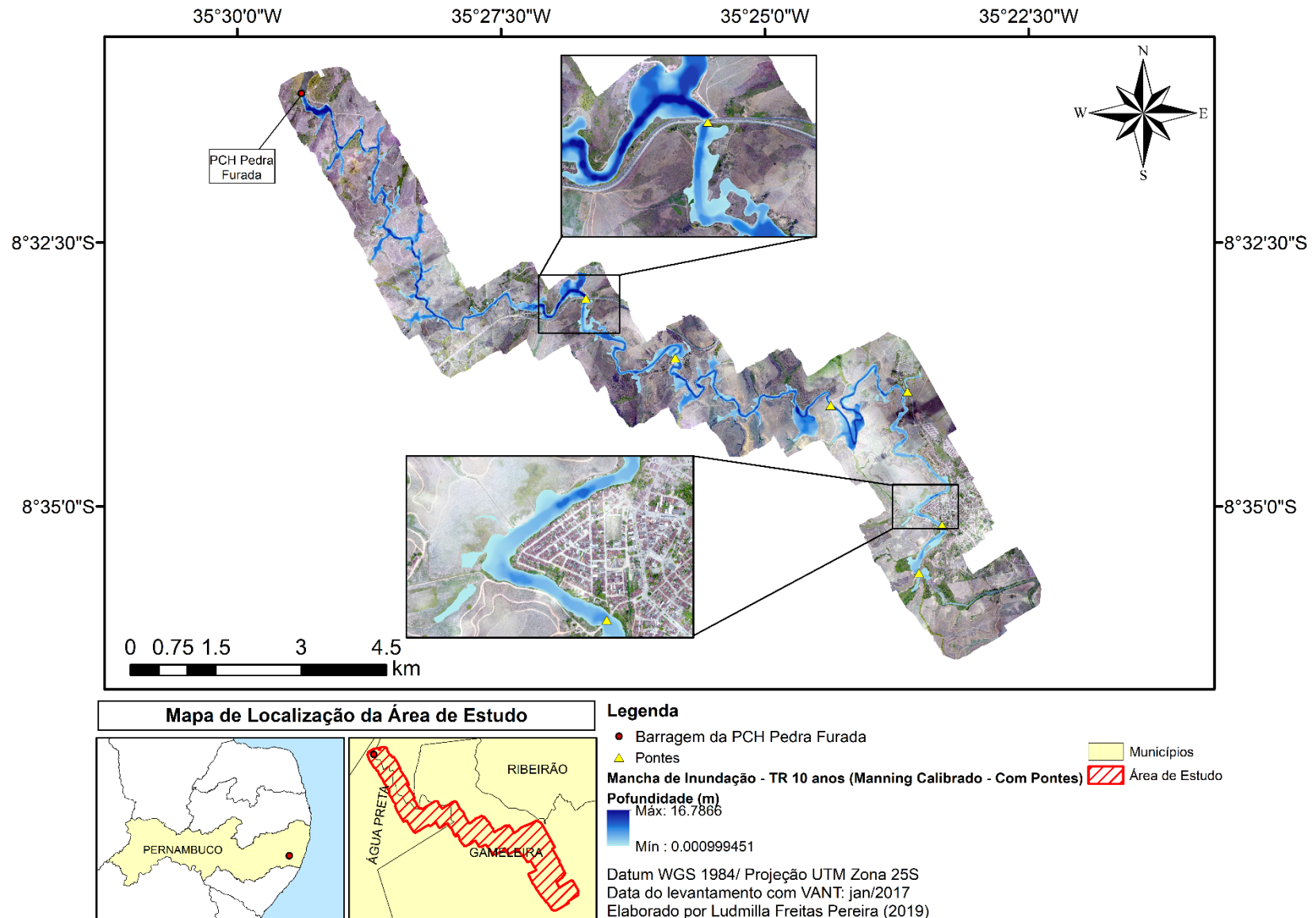
Em termos de uma análise comparativa da área total alagada entre o modelo calibrado sem a inserção de pontes (Cenários 1 e 2 apresentados anteriormente) e com esta inclusão, os resultados apresentados no Quadro 23 e nas Figuras 33 e 34, a seguir demonstram, praticamente, a sobreposição das manchas (a variação dos valores se deu na terceira ou quarta casa decimal), indicando a baixa influência deste recurso.

**Quadro 23** – Comparação entre as áreas alagadas pelas simulações com/sem a inserção de pontes

	TR = 10 anos Sem pontes	TR = 10 anos Com pontes	TR = 10.000 anos Sem pontes	TR = 10.000 anos Com pontes
Área máxima alagada	3,19 km <sup>2</sup>	3,19 km <sup>2</sup>	4,53 km <sup>2</sup>	4,53 km <sup>2</sup>
Altura máxima atingida	16,78 m	16,78 m	23,02 m	23,02 m

Fonte: Própria autora.

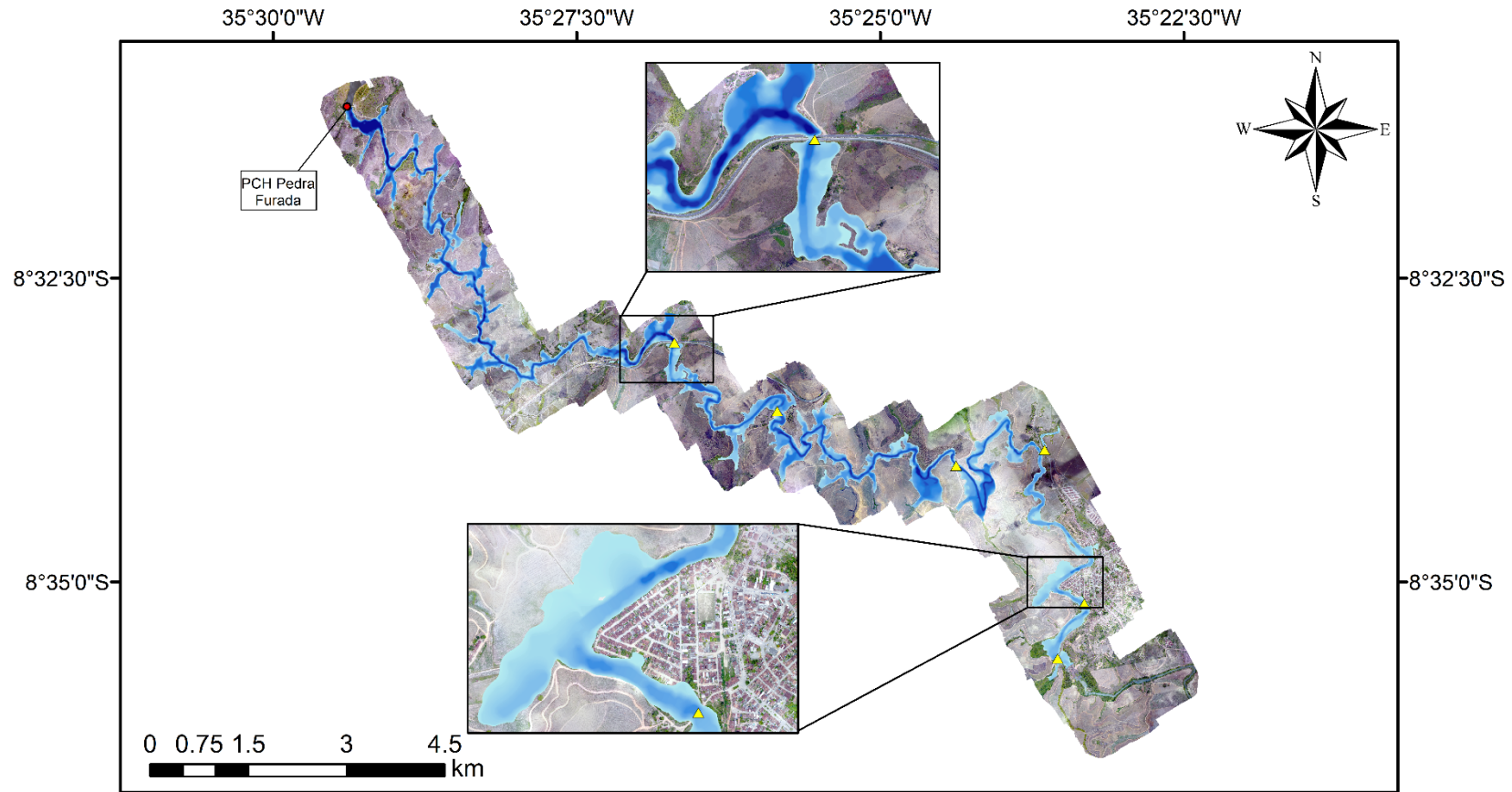
**Figura 31** – Mapa de inundação para um TR = 10 anos utilizando-se coeficientes calibrados, com a inserção das pontes na geometria



Fonte: Própria autora



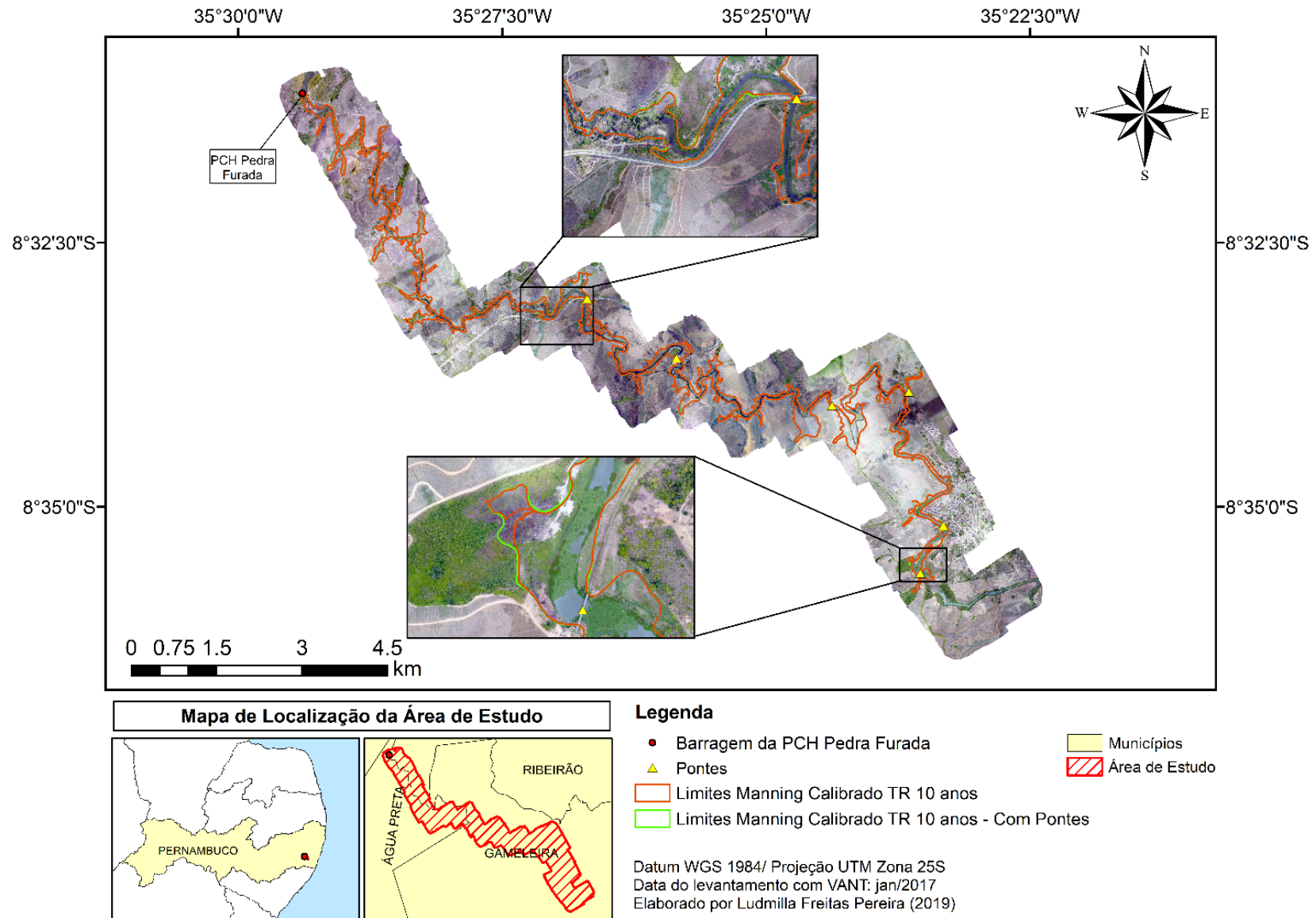
**Figura 32** – Mapa de inundação para um TR = 10.000 anos utilizando-se coeficientes calibrados, com a inserção das pontes na geometria



<b>Mapa de Localização da Área de Estudo</b>		<b>Legenda</b>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>● Barragem da PCH Pedra Furada</li> <li>▲ Pontes</li> <li>Mancha de Inundação - TR 10.000 anos (Manning Calibrado - Com Pontes)</li> <li>Profundidade (m)</li> <li>Máx : 23.0194</li> <li>Mín : 0.000999451</li> <li>Datum WGS 1984/ Projeção UTM Zona 25S</li> <li>Data do levantamento com VANT: jan/2017</li> <li>Elaborado por Ludmilla Freitas Pereira (2019)</li> </ul>

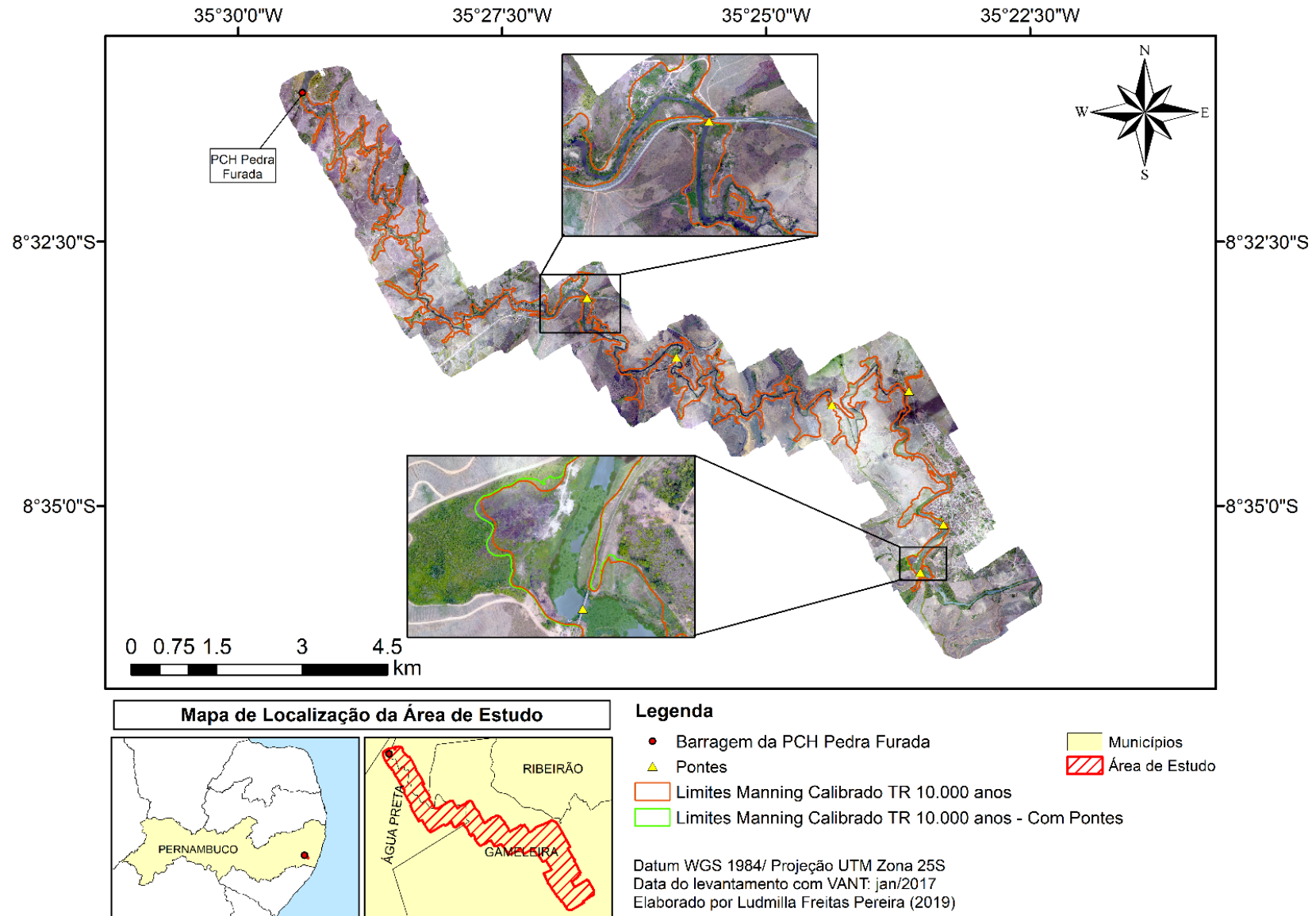
Fonte: Própria autora

**Figura 33** – Comparativo entre a área alagada pelo TR=10 anos utilizando-se coeficientes calibrados, com/sem a inserção das pontes na geometria



Fonte: Própria autora

**Figura 34** – Comparativo entre a área alagada pelo TR=10.000 anos utilizando-se coeficientes calibrados, com/sem a inserção das pontes na geometria



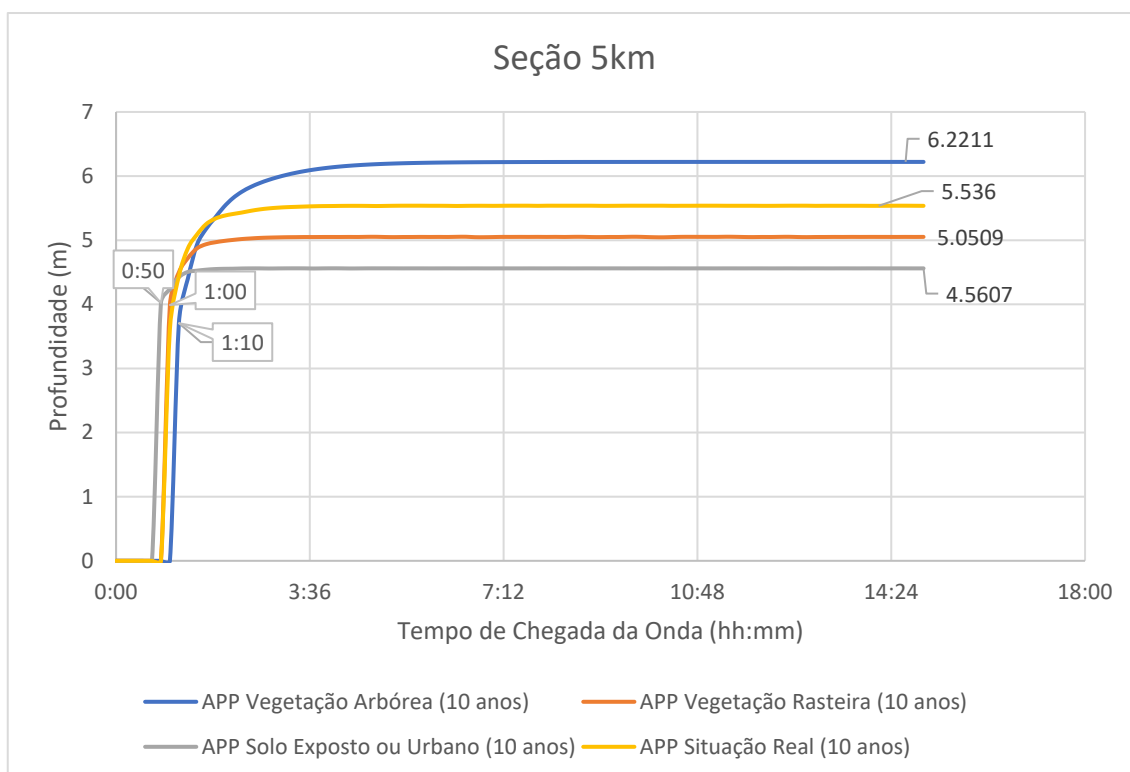
Fonte: Própria autora

## 5.3 COBERTURA DE SOLO DA APP

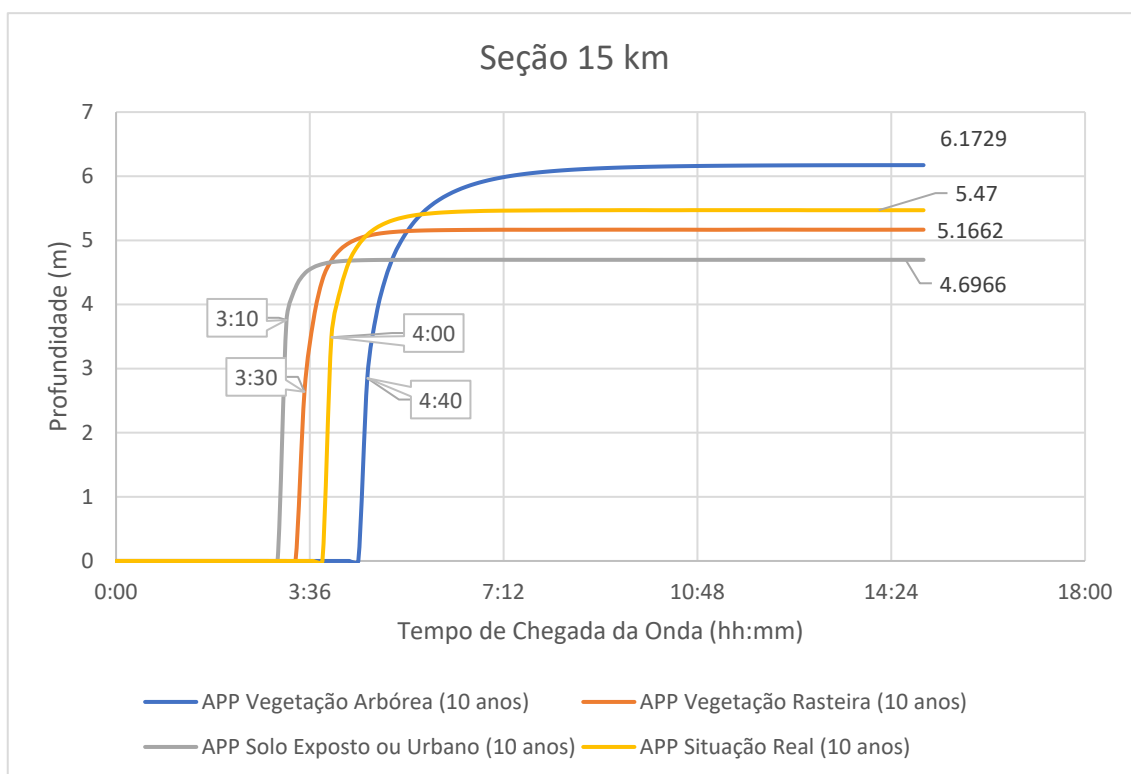
### 5.3.1 Vazão equivalente à TR = 10 anos

Os gráficos apresentados nas Figuras 35, 36 e 37 a seguir, ilustram os tempos de chegada de onda e as respectivas profundidades máximas, para cada cobertura do solo da APP submetidas a uma vazão constante equivalente a um período de retorno de 10 anos, em seções transversais do rio Sirinhaém distando da barragem da PCH Pedra Furada 5 km, 15 km e 25 km, respectivamente.

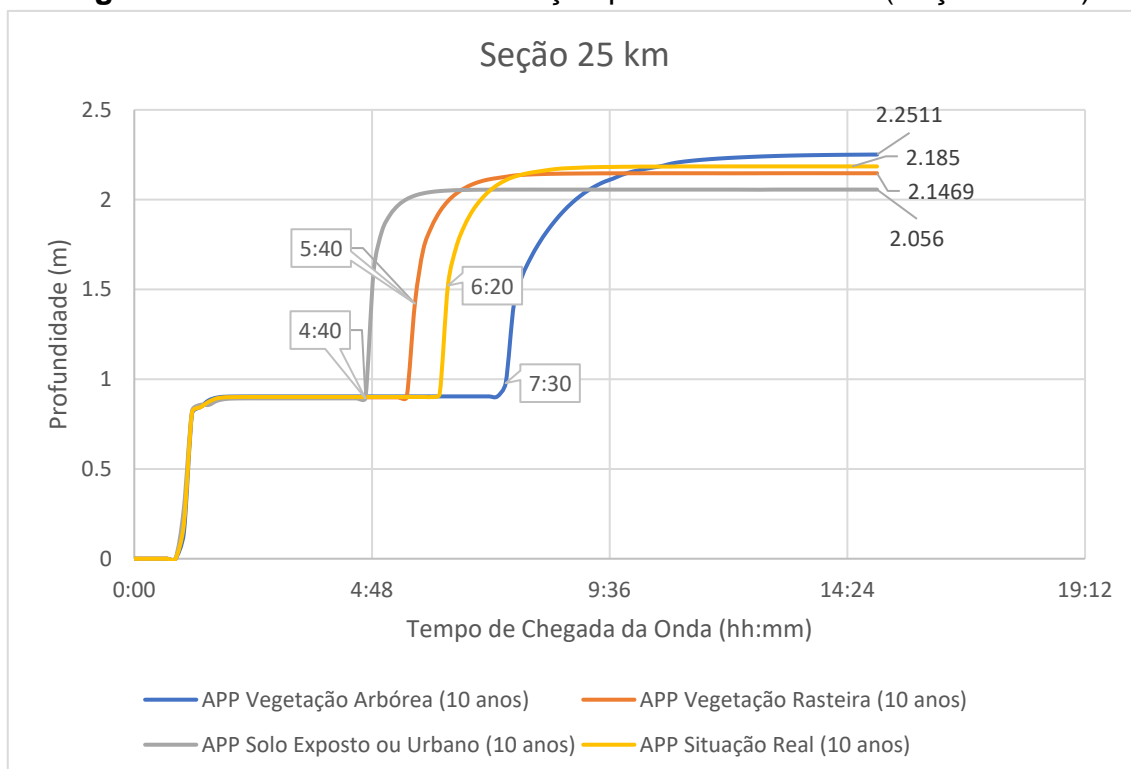
**Figura 35** – Resultados da simulação para TR = 10 anos (Seção 5 km)



Fonte: Própria autora.

**Figura 36** – Resultados da simulação para TR = 10 anos (Seção 15 km)

Fonte: Própria autora.

**Figura 37** – Resultados da simulação para TR = 10 anos (Seção 25 km)

Fonte: Própria autora.

Analisando-se o tempo de chegada da onda de inundação, percebe-se que os efeitos foram se tornando mais evidentes à medida que as seções foram se distanciando da barragem.

Na seção distante 5 km, os tempos de chegada da onda foram bem semelhantes, independentemente da cobertura do solo da APP. Enquanto que, para a seção mais distante (25 km), observa-se que a vegetação arbórea provocou um retardo do tempo de 1 h 50 min em relação à APP totalmente coberta por vegetação rasteira e de 2 h 50 min em relação à cobertura por solo exposto ou áreas urbanizadas.

Comparando-se com a situação real da ocupação das faixas marginais, a cobertura por vegetação arbórea provocaria um atraso no tempo de chegada de onda de 10 minutos para a seção distante 5 km; de 40 minutos para a seção distante 15 km; e de 1h 10 min para a seção distante 25 km.

Por outro lado, estabelecendo-se um comparativo da situação real da ocupação da APP com as hipóteses de recobrimento total por vegetação rasteira, solo exposto ou áreas urbanizadas, não foram identificados atrasos no tempo de chegada de onda.

Esta análise se torna de suma importância, quando do planejamento de ações contingenciais em caso de ocorrências de cheias naturais ou eventuais defluências da barragem, principalmente se for levado em consideração o fato de que a região populosa do município de Gameleira está logo a jusante da seção de 25 km.

Com relação à profundidade, percebe-se que o aumento do coeficiente de rugosidade das áreas de preservação permanente, e conseqüentemente, de vegetação, contribui para o aumento da altura da água na calha do rio.

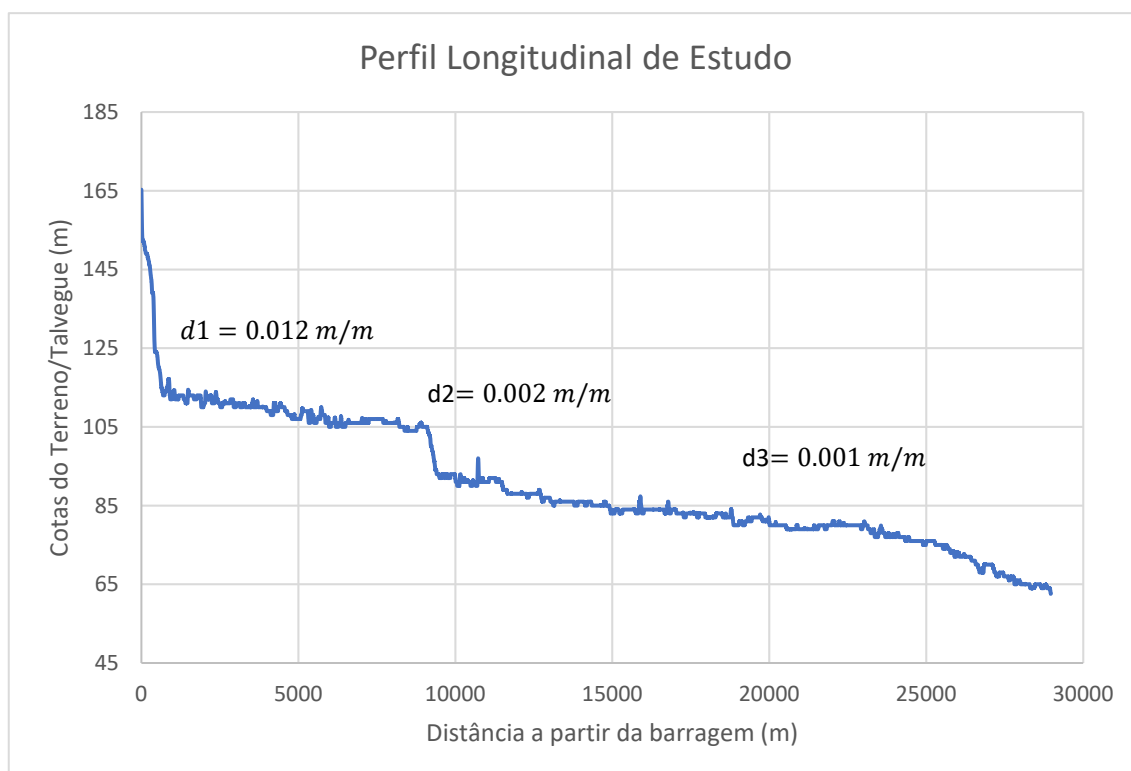
O parágrafo anterior denota aos resultados das simulações, caráter de coerência, uma vez que com o aumento da vegetação nas áreas marginais ao rio, esperava-se que as forças resistivas destas áreas fossem elevadas e conseqüentemente contribuíssem para um aumento da lâmina d'água no canal principal.

No entanto, diferentemente do tempo de chegada da onda, as diferenças entre profundidades atingidas pela água são mais evidentes quando se analisa a seção que dista 5 km da barragem em relação às demais.

Na seção mais próxima ao barramento, o aumento de oito vezes do coeficiente de rugosidade da área correspondente à APP provocou um respectivo aumento de 36% da profundidade da água nesta seção. Já para seção mais distante do barramento, este aumento de rugosidade levou à um acréscimo de 9% da altura da lâmina d'água.

Este comportamento, efeitos mais pronunciados sobre a profundidade no primeiro trecho e sobre os tempos de chegada de onda no último trecho, pode ser justificado pela declividade do talvegue principal de estudo. O primeiro trecho de análise (0-5km) é 12 vezes mais declivoso que o terceiro trecho (15-25km), conforme Figura 38.

**Figura 38** – Perfil longitudinal do trecho de estudo

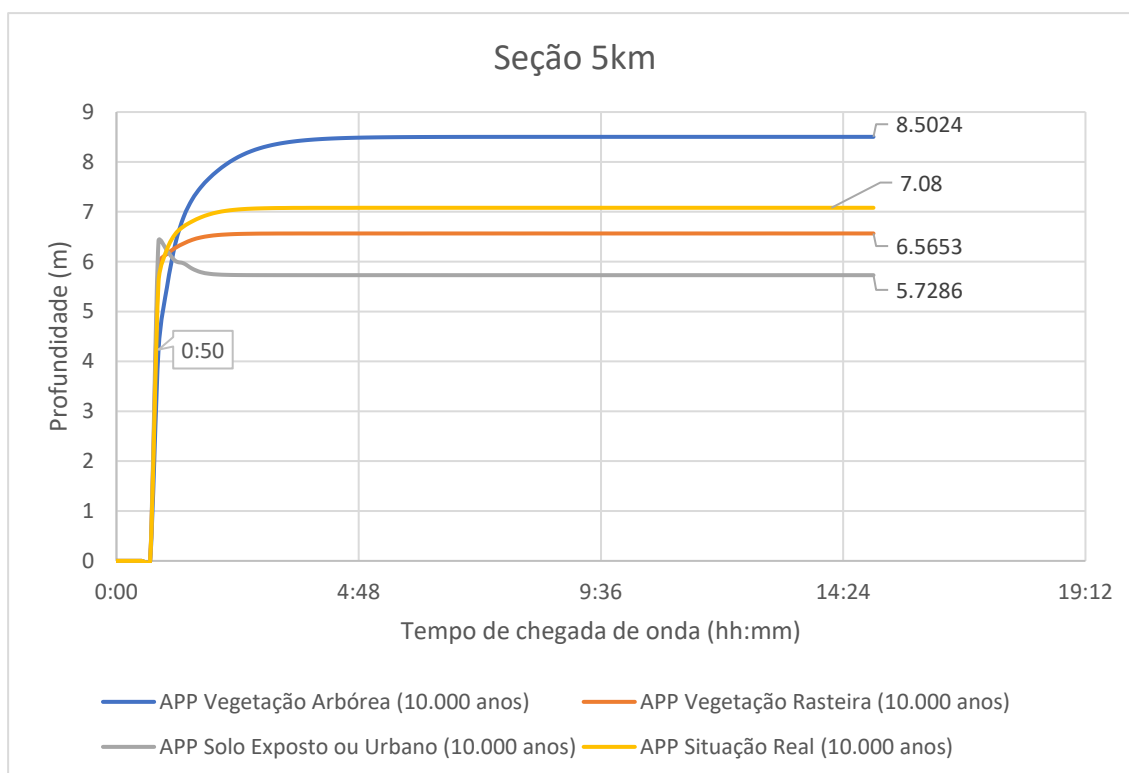


Fonte: Própria autora.

### 5.3.2 Vazão equivalente à TR = 10.000 anos

De maneira análoga ao item anterior, os gráficos ilustrados pelas Figuras 39, 40 e 41 a seguir, apresentam os tempos de chegada de onda e as respectivas profundidades máximas, para cada cobertura do solo da APP submetidas a uma vazão constante equivalente a um período de retorno de 10.000 anos, em seções transversais do rio Sirinhaém distando da barragem da PCH Pedra Furada 5 km, 15 km e 25 km, respectivamente.

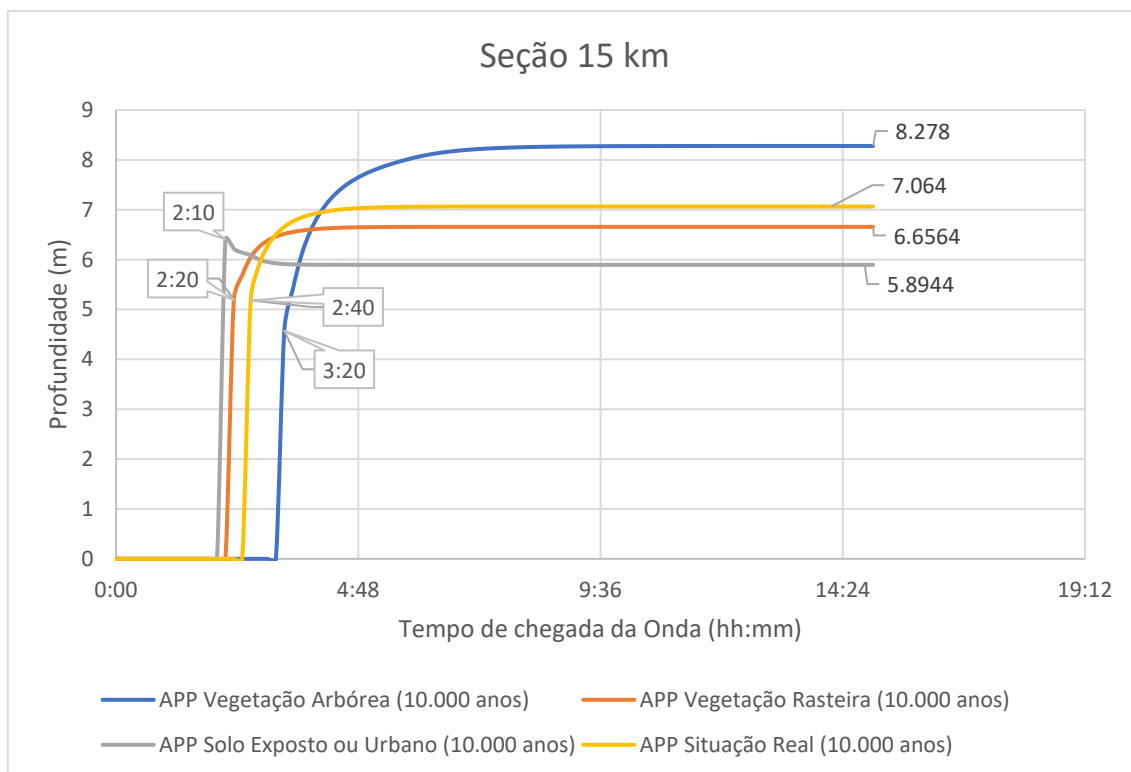
**Figura 39** – Resultados da simulação para TR = 10.000 anos (Seção 5 km)



Fonte: Própria autora.

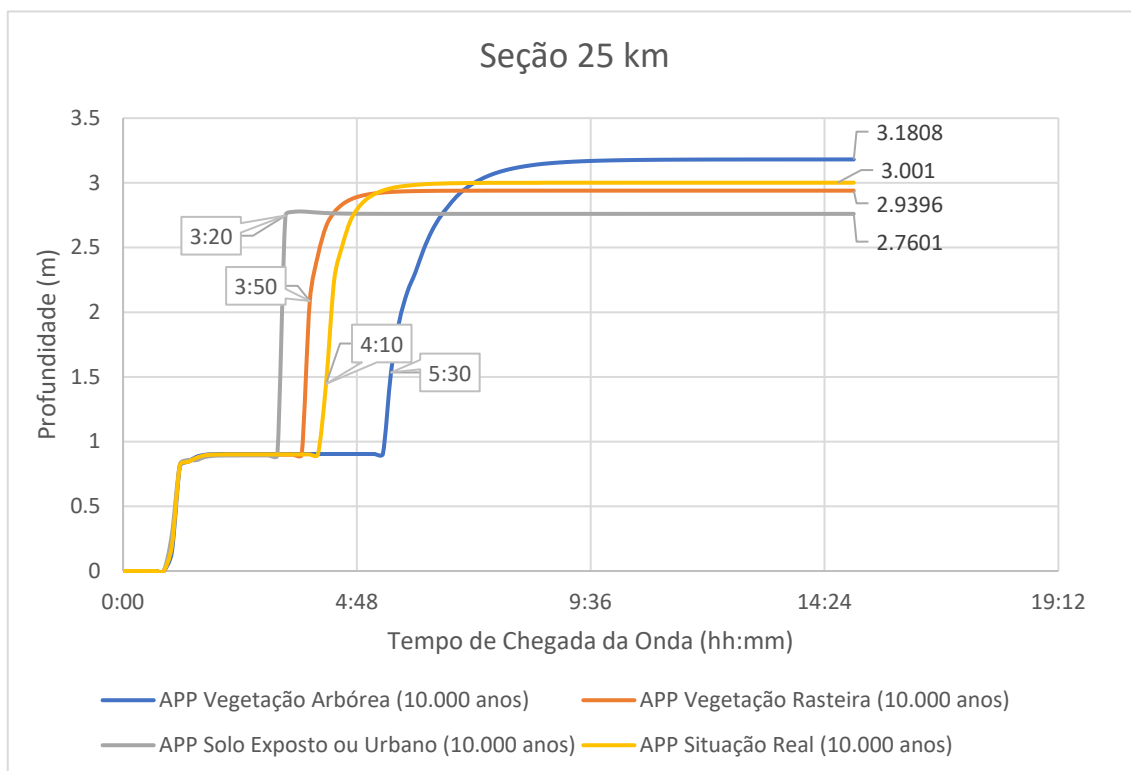


**Figura 40** – Resultados da simulação para TR = 10.000 anos (Seção 15 km)



Fonte: Própria autora.

**Figura 41** – Resultados da simulação para TR = 10.000 anos (Seção 25 km)



Fonte: Própria autora.

De maneira análoga ao cenário de escoamento anterior, a diferença entre os tempos de chegada de onda, se tornou mais pronunciada à medida que as seções foram se distanciando da barragem.

Para a seção distante 5 km, o tempo de chegada de onda foi o mesmo para qualquer cobertura da APP. Nesta mesma seção, a diferença entre os níveis de água máximos atingidos no canal fluvial foi mais expressiva (similar ao cenário de escoamento anterior).

Nas seções de 5 km e 15 km, nota-se a presença de uma inflexão na curva de profundidade da APP coberta por solo exposto ou áreas urbanas. Isto não ocorreu no cenário de vazão mais baixa. Esta inflexão sugere uma variação abrupta de vazão (portanto, a existência de um pico) relacionado ao menor amortecimento do escoamento.

Na seção mais próxima ao barramento, o aumento de oito vezes do coeficiente de rugosidade da área correspondente à APP provocou um respectivo aumento de 48% da profundidade da água nesta seção. Já para seção mais distante do barramento, este aumento de rugosidade levou à um acréscimo de 15% da altura da lâmina d'água.

Para a seção de 25 km, próxima ao município de Gameleira, a presença de vegetação arbórea na APP provocou um atraso de 1 h 20 min em relação à situação real de cobertura das margens e de 2 h 10 min em relação ao tempo de chegada de onda para uma situação de ocorrências de solo exposto ou áreas urbanas. Confirmando-se assim, o caráter de boa prática de reflorestamento destas faixas marginais.

## 6 CONCLUSÕES

A partir do que foi exposto na primeira parte do presente trabalho, tem-se que a Política Nacional de Segurança de Barragens, implementada há nove anos, apresenta algumas práticas ineficientes que devem ser melhoradas como por exemplo, o fato de ser aplicada soberanamente sobre barragens de médio e grande porte, deixando às pequenas barragens instruções e normas menos rígidas.

Além disto, não foram observadas, na legislação brasileira, instruções que impusessem empreendedores, órgãos ambientais ou entes municipais a estruturarem ações que visem garantir a integridade do meio ambiente nas áreas de influência a jusante das barragens, bem como resguardar o bem-estar e a vida da população situada em zonas suscetíveis a inundações. As obrigatoriedades se limitam tão somente à elaboração de estratégias de alerta e comunicação.

A Área de Preservação Permanente (APP) é uma delimitação já estabelecida pelo código florestal brasileiro, mas ainda não é regulamentada como uma ferramenta de gestão de segurança de barragens.

Por meio da aplicação do modelo hidrodinâmico HEC-RAS e simulando-se dois cenários de escoamento (TR=10 anos e TR=10.000 anos), concluiu-se que o aumento da presença vegetal nestas faixas marginais auxiliam na redução do tempo de chegada de onda em regiões do vale a jusante.

Esta inferência é de grande valia para o planejamento de ações de resgate e mobilização da população quando da ocorrência de cenários emergenciais de inundações e enchentes, criando-se um intervalo de tempo maior. Neste estudo, um aumento da rugosidade da APP de 0.01 para 0.08, ou seja, oito vezes, provocou uma redução do tempo de chegada de onda em 2h50 min para o cenário TR = 10 anos e de 2h10min para o cenário de TR=10.000 anos na seção distante 25 km da barragem.

Neste estudo de caso, para áreas mais próximas da barragem (que têm a declividade mais acentuada), pode-se inferir que, independentemente da cobertura da APP, pelo menos dentro de um raio de 5 km, as vazões defluentes

do barramento chegaram com tempos similares. No entanto, a diferença de altura de água na calha do rio, variando-se a cobertura do solo, foi mais expressiva nesta seção.

Em ambos os cenários de vazões, na seção distante 5 km da barragem, o aumento de oito vezes da rugosidade da APP levou ao acréscimo de profundidades da água de, cerca de, 2 metros dentro da calha pluvial, para ambos cenários de vazão.

Ou seja, APPs bem vegetadas representam um menor grau de perigo e intensidade sobre planícies de inundações mais próximas do barramento, enquanto que, para as planícies mais distantes, representam uma janela de tempo maior para a implementação de ações contingenciais, caracterizando-se, assim, como uma boa contribuição para o rol de elementos de segurança de barragens.

Outras simulações hidrodinâmicas foram desenvolvidas no presente trabalho, com intuito de elucidar a complexidade do desenvolvimento destes estudos de previsão de inundações. Notou-se que a variação do coeficiente de rugosidade, exemplificado pelo comparativo do uso de coeficientes calibrados e teóricos, não resultou em impactos significativos na extensão total da mancha de inundação. Ou seja, a área total de impacto não é muito sensível a este parâmetro, diferentemente da profundidade e tempos de chegada de onda.

A inserção de pontes na geometria do modelo bidimensional do HEC-RAS por meio da ferramenta *gates (AS/2D Area Conn)*, visando suprir a ausência de uma maneira direta para esta atividade, não acarretou em diferenças para a simulação realizada sem a consideração das pontes. Considera-se ser, portanto, uma prática atraente para efeitos de visualização de resultados e extração de informações nesses locais, mas que não comprometem e/ou divergem da previsão realizada sem esta aplicação.

## REFERÊNCIAS

ÁFRICA DO SUL. Departamento de Água e Abastecimento. Gabinete de Segurança de Barragens. **Ato nacional de água**. [S.l.: s.n.], 1998.

ÁFRICA DO SUL. Departamento de Água e Abastecimento. Gabinete de Segurança de Barragens. Regulamentos de Segurança de Barragens. [S.l.: s.n.], (Gazeta de Regulação Governamental, 35062, STAATSKOERANT).

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS- ANA. **Encarte especial sobre a Bacia do Rio Doce**: rompimento da Barragem em Mariana/MG. Brasília, DF: Superintendência dos Recursos Hídricos, 2016a. 50 p. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil, Informe 2015. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/aceso-a-informacao/institucional/publicacoes>. Acesso em: 9 set. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS- ANA. **Manual do empreendedor sobre segurança de barragens**: guia de orientação e formulários para inspeções de segurança de barragem. Brasília, DF: ANA, 2016b. v. 2, 222 p. Disponível em: <http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/downloads/publicacoes/ManualEmpreendedor>. Acesso em: 9 set. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS- ANA. **Manual do empreendedor sobre segurança de barragens**: diretrizes para a elaboração de projeto de barragens. Brasília, DF: ANA, 2016c. v. 5, 160 p. Disponível em: <http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/downloads/publicacoes/ManualEmpreendedor>. Acesso em: 9 set. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS- ANA. **Relatório de segurança de barragens 2012-2013**. Brasília, DF: ANA, 2015. 128 p. Disponível em: <http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2013>. Acesso em: 9 set. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS- ANA. **Relatório de segurança de barragens 2014**. Brasília, DF: ANA, 2015. 160 p. Disponível em: <http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2014>. Acesso em: 9 set. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS- ANA. **Relatório de segurança de barragens 2015**. Brasília, DF: ANA, 2016. 168 p. Disponível em: <http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2015-1>. Acesso em: 9 set. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS- ANA. **Relatório de segurança de barragens 2016**. Brasília, DF: ANA, 2017. 226 p. Disponível em: <http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/rsb-2016>. Acesso em: 9 set. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS- ANA. **Relatório de segurança de barragens 2017**. Brasília, DF: ANA, 2018. 84 p. Disponível em:

<http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2017>. Acesso em: 9 set. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS- ANA. **Portal HIDROWEB**. Brasília, DF: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb>. Acesso em: 30 nov. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS- ANA. **Ficha de inspeção da Estação 39450000, julho de 2010**. Brasília, DF: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Disponível em: [www.snirh.gov.br/fichadecampo](http://www.snirh.gov.br/fichadecampo). Acesso em: 9 jun. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS- ANA. **Ficha de inspeção da Estação 39430000, julho de 2010**. Brasília, DF: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Disponível em: [www.snirh.gov.br/fichadecampo](http://www.snirh.gov.br/fichadecampo). Acesso em: 9 jun. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS- ANA. Resolução n. 236, de 30 de janeiro de 2017. Documento nº 00000.005651/2017-42. Brasília, DF, 30 de janeiro de 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO- ANM. Portaria n. 70.389, de 17 de maio de 2017. Versão com retificações de 05/06/2017 e 10/11/2017. Brasília, DF, 17 de maio de 2017.

AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE - APA. **As barragens em Portugal**. Amadora: [s. n.], 2019. Disponível em: <https://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=7&sub2ref=31&sub3ref=1285>. Acesso em: 9 set. 2019.

ASSOCIATION OF STATE DAM SAFETY OFFICIALS - ASDSO. **About ASDSO**. Lexington, [s. n.], 2019. Disponível em: <https://damsafety.org/about>. Acesso em: 9 set. 2019.

BALLESTEROS, J. A.; BODOQUE, J. M.; DÍEZ-HERRERO, A.; SANCHEZ-SILVA, M.; STOFFEL, M. Calibration of floodplain roughness and estimation of flood discharge based on tree-ring evidence and hydraulic modelling. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 403, n. 1-2, p. 103-115, jun. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.045>. Acesso em: 9 set. 2019.

BAO, H. J.; ZHAO, L. Hydraulic model with roughness coefficient updating method based on Kalman filter for channel flood forecast. **Water Science Engineering**, Nanjing, v. 4, n. 1, p. 13-23, mar. 2011. Disponível em: <http://wse.hhu.edu.cn:8080/water/EN/abstract/abstract150.shtml>. Acesso em: 9 de set. 2019.

BRADLOW, D.D., PALMIERI, A., SALMAN, S.M.A. **Regulatory frameworks for Dam Safety: a comparative study**. Washington: The World Bank, 2002. 177 p. Disponível em: <http://www.cawater-info.net/bk/dam-safety/files/damsafety2002e.pdf>. Acesso em: 9 set. 2019.

BRASIL, L. S. S. **Utilização de modelagens uni e bidimensional para a propagação de onda de cheia proveniente de ruptura hipotética de barragem. Estudo de caso:** Barragem De Rio De Pedras – MG. 2005. 222 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

BRASIL. Lei n. 9433, de 8 de janeiro de 1997. **Diário Oficial, Legislativo**, 9 de janeiro de 1997, p. 470.

BRASIL. Lei n. 9984, de 17 de julho de 2000. **Diário Oficial, Legislativo**, 18 de julho de 2000, p. 1.

BRASIL. Lei n. 12334, de 20 de setembro de 2010. **Diário Oficial da União, Legislativo**, 21 de setembro de 2010, p.1.

BRASIL. Lei n. 12.651, de 25 de maio de 2012. **Diário Oficial da União, Legislativo**, 28 de maio de 2012, p. 1.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Vistorias a barragens de mineração deverão ser concluídas neste semestre.** Brasília, DF: [s. n.], 2019a. Disponível em: [http://mi.gov.br/web/guest/area-de-imprensa/todas-as-noticias/-/asset\\_publisher/YEkzzDUSRvZi/content/vistorias-as-barragens-de-mineracao-deverao-ser-concluidas-neste-semester?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fmi.gov.br%2Fweb%2Fguest%2Farea-de-imprensa%2Ftodas-as-noticias%3Fp\\_p\\_id%3D101\\_INSTANCE\\_YEkzzDUSRvZi%26p\\_p\\_lifecycle%3D0%26p\\_p\\_state%3Dnormal%26p\\_p\\_mode%3Dview%26p\\_p\\_col\\_id%3Dcolumn-1%26p\\_p\\_col\\_pos%3D1%26p\\_p\\_col\\_count%3D2%26\\_101\\_INSTANCE\\_YEkzzDUSRvZi\\_advancedSearch%3Dfalse%26\\_101\\_INSTANCE\\_YEkzzDUSRvZi\\_keywords%3D%26\\_101\\_INSTANCE\\_YEkzzDUSRvZi\\_delta%3D20%26p\\_r\\_p\\_564233524\\_resetCur%3Dfalse%26\\_101\\_INSTANCE\\_YEkzzDUSRvZi\\_cur%3D3%26\\_101\\_INSTANCE\\_YEkzzDUSRvZi\\_andOperator%3Dtrue](http://mi.gov.br/web/guest/area-de-imprensa/todas-as-noticias/-/asset_publisher/YEkzzDUSRvZi/content/vistorias-as-barragens-de-mineracao-deverao-ser-concluidas-neste-semester?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fmi.gov.br%2Fweb%2Fguest%2Farea-de-imprensa%2Ftodas-as-noticias%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_YEkzzDUSRvZi%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-1%26p_p_col_pos%3D1%26p_p_col_count%3D2%26_101_INSTANCE_YEkzzDUSRvZi_advancedSearch%3Dfalse%26_101_INSTANCE_YEkzzDUSRvZi_keywords%3D%26_101_INSTANCE_YEkzzDUSRvZi_delta%3D20%26p_r_p_564233524_resetCur%3Dfalse%26_101_INSTANCE_YEkzzDUSRvZi_cur%3D3%26_101_INSTANCE_YEkzzDUSRvZi_andOperator%3Dtrue). Acesso em: 30 jun. 2019.

BRASIL. Senado Federal. **Desarquivado projeto que amplia rigor para segurança de barragens.** Brasília, DF: [s. n.], 2019b. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2019/02/12/senado-desarquiva-projeto-que-trata-de-seguranca-de-barragens>. Acesso em: 30 jun. 2019.

CALIFORNIA DEPARTMENT OF WATER RESOURCES. **Oroville spillway.** Sacramento: [s. n.], 2017. Disponível em: <https://pixel-ca-dwr.photoshelter.com/galleries/C0000OxvlgXg3yfg/G00003YCcmDTx48Y/Oroville-Spillway-Incident-amp-Recovery>. Acesso em: 24 jun. 2017.

CÂMARA, G.; ORTIZ, M. J. Sistemas de informação geográfica para aplicações ambientais e cadastrais: uma visão geral. In: SOUZA, E.; SILVA, M. **Cartografia, sensoriamento e geoprocessamento.** Lavras, UFLA/SBEA, 1998. cap. 2, p.59-88.

COMITÊ BRASILEIRO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS - CBDB.

**Apresentação das barragens.** [S. l.: s.n., 200-]. Disponível em:

[http://www.cbdb.org.br/5-](http://www.cbdb.org.br/5-38/Apresenta%c3%a7%c3%a3o%20das%20Barragens)

[38/Apresenta%c3%a7%c3%a3o%20das%20Barragens](http://www.cbdb.org.br/5-38/Apresenta%c3%a7%c3%a3o%20das%20Barragens). Acesso em: 30 jun. 2019.

CESTARI JUNIOR, E. **Estudo de propagação de ondas em planície de inundação para elaboração de plano de ação emergencial de barragens: UHE Três irmãos estudo de caso.** 2013. 189 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”- UNESP, Ilha Solteira, 2013. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/111148>. Acesso em: 9 de set. 2019.

CHENG, C.; QIAN, X.; ZHANG, Y.; JINBAO, S. Analysis of Dam Safety Management System in China. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGENCY MANAGEMENT AND MANAGEMENT SCIENCES, 1, 2010, Beijing. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2010. p. 110-113. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5563488>. Acesso em: 9 set. 2019.

CHINA. Ministério dos Recursos Hídricos da República Popular da China. **Diretrizes para avaliação de segurança de barragens (SL258 — 2017).** Pequim: Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2017.

CHOW, V.T. **Open-channel hydraulics.** New York: McGraw-Hill, 1959. 680 p.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Análise do Rompimento Hipotética da Barragem de Ernestina. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 2, n.2, p. 191-206, Jul/Dez. 1997.

COOK, J.L. Quantifying peak discharges for historical floods. **Journal of Hidrology**, Amsterdam, v. 96, n. 1-4, p. 29-40, 1987. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(87\)90141-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(87)90141-7). Acesso em: 9 set. 2019.

COUTINHO, M. M. **Avaliação do desempenho da modelagem hidráulica unidimensional e bidimensional na simulação de eventos de inundação em Colatina/ES.** 2015. 260 f. Dissertação (Mestrado Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos)- Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais- UFMG, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUBD-9ZDLZQ>. Acesso em: 9 set. 2019.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Ação emergencial para delimitação de áreas em alto e muito alto risco a enchentes e movimentos de massa (Gameleira – Pernambuco).** [S.l.: s.n.], 2013. p. 13. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/19956.1>. Acesso em: 30 jun. 2019.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Setorização de áreas em alto e muito alto risco a movimentos de massa, enchentes e inundações (Gameleira –**



- Pernambuco**). [S.l.: s.n.], 2018. p. 40. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/19956>. Acesso em: 30 jun. 2019.
- CHINA STANDARDS ON REVIEW ENGAGEMENTS- CSRES. **Dam safety**. Hainan: XUNHAI Technology, 2019. Disponível em: <http://www.csres.com/s.jsp?keyword=%B4%F3%B0%D3+%B0%B2%C8%AB&pageNum=1>. Acesso em: 9 mar. 2019.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA- DAEE. Secretaria de Estado de Energia, Recursos Hídricos e Saneamento. **Guia prático para projetos de pequenas obras hidráulicas**. São Paulo: DAEE, 2005. 116 p. Disponível em: [http://www.daee.sp.gov.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=124:guia-pratico&catid=41:outorga](http://www.daee.sp.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=124:guia-pratico&catid=41:outorga). Acesso em: 9 set. 2019.
- DELAI, F.; KISS, T.; NAGY, J. Field-based estimates of floodplain roughness along the Tisza River (Hungary): the role of invasive *Amorpha Fruticosa*. **Applied Geography**, Oxford, v. 90, p. 96-105, jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.11.006>. Acesso em: 9 set. 2019.
- DE LIMA, A. A; NAGHETTINI M. **Análise de frequência de eventos anuais-ALEA**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 2001. Disponível em: <http://www.ehr.ufmg.br/downloads/>. Acesso em: 9 set. 2019.
- CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A.- ELETROBRAS. **Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas**. Rio de Janeiro: ELETROBRAS, 2003. 279 p.
- FULLER, W. E. Flood flows. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, New York, v. 77, n. 1, p. 564 – 617, 1914.
- INTERAGENCY COMMITTEE ON DAM SAFETY- ICODS. Departamento de Segurança Interna dos Estados Unidos. Federal Emergency Management Agency- FEMA. **Federal Guidelines for Dam Safety (FEMA 93)**. [S. l.: s. n.], April, 2004. Disponível em: <https://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1502-20490-5785/fema-93.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2018.
- INTERNATIONAL COMISSION ON LARGE DAMS- ICOLD. Comission Internationale des Grands Barrages- CIGB. **World register of dams**: updated April 2018. [S. l.: s.n., 200-]. Disponível em: [http://www.icold-cigb.net/GB/world\\_register/world\\_register\\_of\\_dams.asp](http://www.icold-cigb.net/GB/world_register/world_register_of_dams.asp). Acesso em: 30 jun. 2019.
- INTERNATIONAL WATER POWER. **Chinese dam safety**: philosophy and practice. Dartford: Compelo, 1999. Disponível em: <http://www.waterpowermagazine.com/features/featurechinese-dam-safety-philosophy-and-practice/>. Acesso em: 24 jun. 2018.
- INSTITUTO DE PESQUISA DE RELAÇÕES INTERNACIONAIS- IPRI. **As 15 maiores economias do mundo**. Brasília, DF: [s. n.], 2017. Disponível em:

<http://www.funag.gov.br/ipri/index.php/o-ipri/47-estatisticas/94-as-15-maiores-economias-do-mundo-em-pib-e-pib-ppp>. Acesso em: 24 jun. 2018.

KATZ, R. W.; PARLANGE, M. B.; NAVEAU, P. Statistics of extremes in hydrology. **Advances in Water Resources**, Southampton, v. 25, n. 8-12, p. 1287–1304, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00056-8](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00056-8). Acesso em: 9 set. 2019.

KAISER, A.; NEUGIRG, F.; HAAS, F.; SCHMIDT, J.; BECHT, M.; SCHINDEWOLF, M. Determination of hydrological roughness by means of close range remote sensing. **SOIL**, Munich, v. 1, n. 2, p. 613-620, 2015. Disponível em: <https://www.soil-journal.net/1/613/2015/>. Acesso em: 9 set. 2019.

KANASHIRO, W. H. **Curso de segurança de barragens: módulo I - barragens: aspectos legais, técnicos e socioambientais. Unidade 6: noções de hidráulica**. Brasília, DF: Agência Nacional de Águas - ANA, 2016. Disponível em: <https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/handle/ana/110>. Acesso em: 30 jun. 2019.

KIDSON, R., RICHARDS, K. S., AND CARLING, P. A. Hydraulic model calibration using a modern flood event: the MAE chaem river, Thailand. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON PALAEOFLOOD AND HISTORICAL EVIDENCE IN FLOOD RISK ASSESSMENT, 2002, BARCELONA- PHEFRA, 1., 2002, Barcelona. **Proceedings...** Barcelona: [s. n.], 2002. p. 171-176. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/238066854>. Acesso em: 9 set. 2019.

LEITÃO, F. T. P. **Modelagem hidrodinâmica 1D, 1D/2D e 2D do efeito de maré no Rio Cocó**. 2018. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

MANNING, R. On the flow of water in open channels and pipes. **Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland**, Dublin, v. 20, p. 161-207, 1891.

MARANGONI, T. T.; SANTINI JUNIOR, M. A.; NASCIMENTO, J. N. O. A utilização do HEC-RAS para determinar cota de inundação na ruptura hipotética de uma barragem - estudo de caso da PCH Salto Buriti. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017, Florianópolis. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2017. 8 p. Disponível em: [http://evolvedoc.com.br/xxiisbrh/detalhes-287\\_a-utilizacao-do-hec-ras-determinar-cota-de-inundacao-na-raptura-hipotetica-de-uma-barragem-estudo-de-caso-da-pch-salto-buriti](http://evolvedoc.com.br/xxiisbrh/detalhes-287_a-utilizacao-do-hec-ras-determinar-cota-de-inundacao-na-raptura-hipotetica-de-uma-barragem-estudo-de-caso-da-pch-salto-buriti). Acesso em: 9 set. 2019.

MENESCAL, R. A. **Gestão da segurança de barragens no Brasil: proposta de um sistema integrado, descentralizado, transparente e participativo**. 2009.769 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará- UFC, Fortaleza, 2009.

MINAS GERAIS. DEFESA CIVIL ESTADUAL. **Informações:** desastre barragem de rejeitos de Brumadinho. Belo Horizonte: [s. n.], 2019.

Disponível em:

<[http://www.defesacivil.mg.gov.br/index.php/component/gmg/page/678-Inf\\_Brumadinho\\_0506](http://www.defesacivil.mg.gov.br/index.php/component/gmg/page/678-Inf_Brumadinho_0506)>. Acesso em: 9 jun. 2019.

MONTE, B. E.O; COSTA, D. D.; CHAVES, M. B.; MAGALHÃES, L. O.; UVO, C. B. Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada ao mapeamento de áreas inundáveis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 152-167, jan.-mar. 2016. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p152-167>. Acesso em: 9 set. 2019.

NAGHETTHINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552 p.

OLIVEIRA, A. C. C.; XAVIER, N. M. S; ALMEIDA, L. V. F.; OTTONELLI, J. P.; CORREA, J. M.; ALMEIDA, A. K.; ALMEIDA, I. K. Modelos probabilísticos de distribuição na previsão de eventos extremos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017, Florianópolis. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2017. 8 p. Disponível em: [http://evolvedoc.com.br/xxiisbrh/detalhes-588\\_modelos-probabilisticos-de-distribuicao-na-previsao-de-eventos-extremos](http://evolvedoc.com.br/xxiisbrh/detalhes-588_modelos-probabilisticos-de-distribuicao-na-previsao-de-eventos-extremos). Acesso em: 9 set. 2019.

PEREIRA, G. M. **Projeto de usinas hidrelétricas: passo a passo**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

PEREIRA, L. F.; TASHIMA, M. M.; LIMA, C. G. R. The influence of surface cover on parameters of the characterization of floods coming from the rupture of dams in downstream areas. In: INTERNATIONAL DAM WORLD CONFERENCE, 3., 2018, Foz do Iguaçu. **Proceedings...** [S.l.]: IBRACON, 2018. 9 p. Disponível em: <https://1drv.ms/f/s!AmzgnSDqOvMdoGwxMuf8G2tpaMN>. Acesso em: 9 set. 2019.

PINHEIRO, M. C. **Diretrizes para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamentos hidráulicos em obras de mineração**. 1. ed. Porto Alegre: ABRH, 2011. 308 p.

PISANIELLO, J. D.; DAM, T. T.; TINGEY-HOLYOAK, J. L. International small dam safety assurance policy benchmarks to avoid dam failure flood disasters in developing countries. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 531, n. 3, p. 1141–1153, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.077>. Acesso em: 9 set. 2019.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: EESC/ USP, 2006.

PORTUGAL. Decreto-lei n. 21, de 28 de março de 2018. Altera o regulamento de segurança de barragens e aprova o regulamento de pequenas barragens. **Lex: Diário da República**, 1ª série, n. 62, 2018.

SABALOW, R.; STANTON, S. **Breaking:** no word when evacuation order for 188,000 will be lifted as Oroville threat remains. [S. l.: s. n.] 2017. Disponível

em: <<http://www.sacbee.com/news/state/california/water-and-drought/article132332499.html>>. Acesso em: 29 set. 2017.

SANTOS, K. A. **Modelagem do acompanhamento e controle de cheias em bacias hidrográficas de grande variação de altitude**: estudo de caso Bacia do Rio Mundaú. 2013. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/11624>. Acesso em: 9 set. 2019.

STRAATSMA, M. W., WARMINK, J. J.; MIDDELKOOP, H. Two novel methods for field measurements of hydrodynamic density of floodplain vegetation using terrestrial laser scanning and digital parallel photography. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 29, n. 5, p. 1595–1617, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431160701736455>. Acesso em: 9 set. 2019.

SUDHAUS, D.; SEIDEL, J.; BÜRGER, K.; DOSTAL, P.; IMBERY, F.; MAYER, H.; GLASER, R.; KONOLD, W. Discharges of past flood events based on historical river profiles. **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 12, n. 5, p. 1201–1209, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-12-1201-2008>. Acesso em: 9 set. 2019.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia**: ciência e aplicação. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS Editora, 2001. 943 p.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS- USACE. **HEC-RAS river analysis system 2D modeling user's manual**. Davis: USACE, 2016.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245 p.

WISEU, M. T. **Segurança dos vales a jusante de barragens**: metodologias de apoio à gestão do risco. 2006. 420 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008. Disponível em: <http://repositorio.inec.pt:8080/jspui/handle/123456789/15575>. Acesso em: 9 set. 2019.

WANG, B.; CHEN, Y.; WU, C.; PENG, Y.; SONG, J.; LIU, W.; LIU, X. Empirical and semi-analytical models for predicting peak outflows caused by embankment dam failures. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 562, p. 692–702, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.049>. Acesso em: 9 set. 2019.

## APÊNDICE 1 – PROCESSO DE SOLICITAÇÃO DE DADOS PARA DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA



### SOLICITAÇÃO DE AUTORIZAÇÃO DE BANCO DE DADOS PARA PESQUISA

Eu, Ludmilla Freitas Pereira, aluna regular do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil da UNESP (Câmpus de Ilha Solteira) na área de Recursos Hídricos e Tecnologia Ambiental, sob orientação do Prof. Dr. Mauro Mitsuuchi Tashima e co-orientação do Prof. Dr. César Gustavo da Rocha Lima, venho, por meio deste documento, solicitar uma autorização à empresa Atiaia Energia para que utilizemos, em nosso projeto de pesquisa, dados de levantamento de campo referentes à caracterização da área a jusante da PCH Pedra Furada e informações constituintes da ficha técnica do empreendimento, viabilizados e de posse da empresa Geometrisa – Serviços de Engenharia Ltda.

O referido projeto de pesquisa tem por objetivo *analisar a influência da cobertura vegetal* e, conseqüentemente, do coeficiente de rugosidade, *sobre os parâmetros de caracterização de manchas de inundação* simuladas por modelagem hidrodinâmica, isto é: altura da lâmina d'água, velocidade da onda, vazões, alcance, entre outros. A partir desse propósito, e simulando diversos cenários **hipotéticos**, será elaborada a tese de defesa do título de Mestre em Recursos Hídricos e Tecnologia Ambiental da requerente.

Frente à excelente qualidade dos levantamentos de campo (dados topobatimétricos) executados em 2017 durante um serviço prestado pela Geometrisa – Serviços de Engenharia Ltda para a Atiaia Energia, considera-se que a utilização de tais dados para um estudo de caso da PCH Pedra Furada nesta dissertação será de grande valia para a comunidade acadêmica e pesquisa científica, proporcionando um modelo hidrodinâmico de caráter **didático** e de prático entendimento.

Ressalta-se que não há intenções de comercialização dos dados ou promoção pejorativa da imagem do empreendimento ou da empresa. A utilização do banco de dados será estritamente com vistas ao fomento da pesquisa científica em um assunto tão recente e carente de investimentos científicos, como o que se refere à segurança de barragens. Ao longo do desenvolvimento da pesquisa, cabe destacar a possibilidade de produção de artigos científicos passíveis de acarretarem publicações em periódicos, revistas e congressos, onde sempre serão feitas menções de agradecimento à Atiaia Energia pelo o apoio prestado.

Contando com a autorização desta instituição, colocamo-nos à disposição para qualquer esclarecimento.

Ilha Solteira – SP, 19 de junho de 2018.

Ludmilla Freitas Pereira  
Engenheira Civil graduada na UNESP – FEIS  
Mestranda em Recursos Hídricos e Tecnologia Ambiental (UNESP – FEIS)

23/11/2018

ENC: ENC: RES: PCH Pedra Furada - MESTRADO

**ENC: ENC: RES: PCH Pedra Furada - MESTRADO**

| SEG JUL 2 | 4 min lido | 1

Ludmilla, boa tarde.

Segue no e-mail abaixo autorização da diretoria.

Favor encaminhar para nossa análise antes da publicação final.

Bom estudo!!!

Att,

-----  
Manutenção – Supervisor de Engenharia Civil  
55 65 3363 6552 • 55 65 98111.0947  
Av. Hist. Rubens Mendonça, nº 2000 sl 1207  
Bosque Saúde • Cuiabá • MT • CEP 78050-000

De:

Enviada em: quarta-feira, 20 de junho de 2018 09:02

Para:

Cc:

Assunto: Re: ENC: RES: PCH Pedra Furada - MESTRADO

Autorizo.

Enviado do meu iPhone

Em 20 de jun de 2018, à(s) 14:56,

<

> escreveu:

....., bom dia.

Segue anexa solicitação de uma engenheira que participou da elaboração do Plano de Ação e Emergência da PCH PFU. Atualmente, ela está iniciando um mestrado e gostaria de utilizar os dados coletados durante o PAE de PFU como tema de sua dissertação.

Att,

Manutenção – Supervisor de Engenharia Civil  
55 65 3363 6552 • 55 65 98111.0947  
Av. Hist. Rubens Mendonça, nº 2000 sl 1207  
Bosque Saúde • Cuiabá • MT • CEP 78050-000



