



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

BRENDA ARIELLY MENDONÇA RODRIGUES

**PROPOSIÇÃO DE METODOLOGIA PARA O TRAÇADO DE ROTAS DE FUGA EM
CASO DE FALHA EM BARRAGEM**

FORTALEZA

2021

BRENDA ARIELLY MENDONÇA RODRIGUES

PROPOSIÇÃO DE METODOLOGIA PARA O TRAÇADO DE ROTAS DE FUGA EM CASO
DE FALHA EM BARRAGEM

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Vieira Bertocini

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R611p Rodrigues, Brenda Arielly Mendonça.
Proposição de metodologia para o traçado de rotas de fuga em caso de falha em barragem / Brenda Arielly Mendonça Rodrigues. – 2021.
82 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Bruno Vieira Bertoncini.

1. Rota de Fuga. 2. Segurança de Barragem. 3. Evacuação. 4. Ruptura de Barragens. I. Título.

CDD 620

BRENDA ARIELLY MENDONÇA RODRIGUES

PROPOSIÇÃO DE METODOLOGIA PARA O TRAÇADO DE ROTAS DE FUGA EM CASO
DE FALHA EM BARRAGEM

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 25 de Março de 2021

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Bruno Vieira Bertoncini (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Mário Ângelo Nunes de Azevedo Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Mikaelle Duarte Mariano
Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
(COGERH)

À minha família e a todos que se beneficiarem
desse estudo!

AGRADECIMENTOS

À Deus e à minha Mãe Santíssima, pela vida, pela minha capacitação diária e por todas as amizades conquistadas que foram essenciais nesse processo. Eles me mandaram anjos em forma de pessoas.

Aos meus amados pais, Rosângela e Marcos, pela atenção, pelo carinho e pelo amor devotado todos esses anos e por terem proporcionado as melhores condições para que eu pudesse superar mais esse obstáculo. Às minhas irmãs e melhores amigas, Amanda e Camila, por terem sido fontes de amor, de atenção, de cumplicidade e de tira-dúvidas de português e de inglês. Amo todos vocês e a dog Dandan que é um dos amores mais puros da minha vida.

Ao meu namorado, Gustavo, por ter me impulsionado desde o início a seguir aquilo que eu queria, mesmo quando não confiei que conseguiria, e por ter me ajudado diversas vezes nas discussões das dúvidas que surgiam e nas revisões do texto. Amo-te.

Aos profissionais da saúde física e mental, mestre Índio (Associação Viver Capoeira), Clarisa e a todas as formas de arte que me fizeram sentir esse processo de forma mais satisfatória e mais criativa.

Aos amigos conquistados na graduação que tornaram a rotina mais leve (Bia, Gaby's, Babi, Tereza, Joelia ...), em especial àqueles que se fizeram presente nesse último ano e que me ajudaram com as dores e com as diversas dúvidas : Alexandre, Wanderson, Letícia, Caio e Aldaianny, existe um pedacinho de vocês em cada parte desse trabalho.

Ao meu orientador, prof. Bertoncini, por ser paz, por ser humildade e pelo ser humano incrível que topou me acompanhar nessa aventura insana e que me guiou da maneira mais empática e inteligente possível (sim, cada reunião eu pensava em como eu tinha procurado o cara certo). Obrigada por ter sido chave no meu amadurecimento durante todo esse tempo.

Ao prof. Antônio Paulo que foi LUZ em uma momento de completa escuridão em uma das fases desse trabalho e à professora Verônica por todo o empenho em nos proporcionar um ano construtivo. Ao professor Mário Ângelo e à engenheira Mikaelle Duarte por terem me dado a honra de tê-los na minha banca e pela contribuição no aprimoramento desse trabalho.

À Luísa Ciríaco que foi a pessoa que me incentivou, inicialmente, a fazer o estudo de rotas de fuga e que disponibilizou os resultados do seu PG para que eu pudesse construir o meu.

A toda a equipe da COGERH, pela recepção e por todos os ensinamentos, em especial à Amanda, à Mikaelle e à Itamara que me auxiliaram nas dúvidas e que me forneceram materiais quando o tema ainda era bem desconhecido.

"É verdade: são poucos e raros os que sabem para onde olhar e o que escutar. Mas, assim como nas melhores histórias, são esses que fazem a diferença."

(Livro: "O labirinto do fauno")

RESUMO

As barragens são estruturas que proporcionam muitos benefícios para a população em seu entorno. Apesar disso, devido ao grande volume de material acumulado, uma situação de emergência envolvendo essas estruturas pode ocasionar um desastre com perdas imensuráveis nos vales a jusante. Devido a isso, a Lei Nº 12.334/2010, que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens, propõe a elaboração do Plano de Segurança de Barragens (PSB) que deve conter, entre outras coisas, o Plano de Ação Emergencial (PAE), descrevendo as ações a serem tomadas em caso de emergência e, junto ao Plano de Contingência (PLANCON), determinar as áreas seguras e as rotas a serem percorridas para a devida evacuação da população. Assim, surgiu a necessidade de propor método de escolha de rotas e de locais seguros de forma que a tomada de decisões não seja fruto de ações subjetivas, diminuindo a ocorrência de erros. Considerou-se, primeiramente, os estudos existentes sobre vulnerabilidade regional para a seleção de parâmetros que fossem compatíveis com a presente análise, determinando os passos para a verificação dos locais mais vulneráveis em caso de emergência, a zona de autossalvamento e a quantidade de pessoas a ser evacuada na região. Analisando as áreas que estariam em segurança, foi possível delimitar os abrigos e calcular as respectivas capacidades. Em posse do ponto de origem da evacuação e dos pontos de destino, houve o traçado da rota de fuga de forma geométrica, considerando o caminho mais curto, o cálculo da duração da evacuação e da quantidade de pessoas impactadas. Por se tratar de um experimento, esse processo se deu de forma simplificada, levando em consideração características geométricas da região, existindo limitações práticas. Finalmente, foram determinadas quais rotas conseguiriam evacuar em tempo hábil, quais soluções poderiam ser aplicadas nas regiões que não apontaram roteiros viáveis e quais sugestões poderiam ser incrementadas para melhorar a aderência do modelo.

Palavras-chave: Rota de Fuga; Segurança de Barragem; Evacuação; Ruptura de Barragens

ABSTRACT

Dams are structures that provide many benefits to the population. Despite this, due to the high volume of accumulated material, an emergency situation involving them may cause a disaster with immeasurable losses in the downstream valleys. For this reason, the Brazilian law N 12.334/2010, which established The National Dams Safety Policy, proposes the elaboration of The Dam Safety Plan (PSB), which must contain, among other things, The Emergency Action Plan (EAP) which describes the actions to be taken in the event of an emergency and, together with the Emergency Plan (PLANCON), determine the safe areas and routes to be covered for the correct evacuation of the population. Thereby, there is a need to propose a method that describes route and safe areas choice, so as decisions can be elaborated from non subjective action, reducing error. First, existing regional vulnerability studies were considered in order to select the parameters compatible to this analysis, determining the steps to check the most vulnerable places in case of emergency, the self-rescue zone and the number of people to be evacuated. By analyzing those safe areas, it was possible to delimit the shelters and to calculate the respective capabilities. Knowing the evacuation origin point and the destination, were plotted escape routes in a geometric way, considering the shorter route, the calculation of the process duration and the number of people affected. Being an experiment, this process took place in a simplified way, taking into account the geometric characteristics of the region, presenting practical limitations. Finally, it was determined those routes that would be able to evacuate in time, what solutions could be applied in regions that have not indicated viable roadmaps and what tips could be increased to improve pattern fit.

Keywords: Scape route; Dam Security; Evacuation; Dam break.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo de fases da gestão de risco	22
Figura 2 – Caracterização genérica das situações que acionam os diversos níveis de resposta	23
Figura 3 – Zoneamento de risco proposto pela PNSB e pelo CENAD.	24
Figura 4 – Processo de formação de <i>piping</i> por erosão regressiva	25
Figura 5 – Zonas de regime de escoamento e zonas de erosão durante o galgamento de uma barragem de aterro.	26
Figura 6 – Processo de abertura da brecha e formação da onda em relação ao tempo disponível para as ações de resposta.	27
Figura 7 – Classificação dos modelos de simulação do escoamento por escala de precisão, segundo Lauriano (2009).	27
Figura 8 – Questões necessárias para análise e mapeamento das áreas de risco.	30
Figura 9 – Número dos setores e dinâmica de água e efluente por grau de risco.	31
Figura 10 – Número dos setores e densidade de construção por grau de risco.	31
Figura 11 – Fluxograma representativo do método	39
Figura 12 – Detalhe da localização dos açudes Fogareiro, Quixeramobim e Banabuiú	40
Figura 13 – Faixa de vulnerabilidade social	41
Figura 14 – Rio principal, reservatórios e seções transversais	43
Figura 15 – Conversão em mapa axial	48
Figura 16 – Cálculo dos parâmetros da Sintaxe Espacial	49
Figura 17 – Inserção da camada de entrada do modelo	50
Figura 18 – Inserção função "Buffer"	50
Figura 19 – Inserção da função "Interseção"	51
Figura 20 – Área inundada pela mancha de ruptura da barragem Quixeramobim - cenário 1	55
Figura 21 – Área inundada pela mancha de ruptura da barragem Quixeramobim - cenário 2	55
Figura 22 – Nível d'água máximo médio por trecho obtido para o Cenário 1	56
Figura 23 – Mapa temático da ZAS para a região a jusante da barragem Quixeramobim.	57
Figura 24 – Mapa temático do Índice de Vulnerabilidade Social para a região a jusante da barragem	58
Figura 25 – Mapa temático do Índice de Densidade Demográfica para a região a jusante da barragem	60

Figura 26 – Mapa axial em escala de cor para a Integração Individual das Vias (iiv) . . .	61
Figura 27 – Mapa temático do Índice de Integração das Vias para a região a jusante da barragem	62
Figura 28 – Mapa temático do Índice de Vulnerabilidade de Evacuação para a região a jusante da barragem	63
Figura 29 – Representação da quantidade de pessoas existente na ZAS por setor censitário.	65
Figura 30 – Representação das rotas de acordo com a duração da evacuação.	67
Figura 31 – Áreas de influência por origem de rota	68
Figura 32 – Detalhe das rotas que se sobrepõem	69
Figura 33 – Identificação da barragem e dos hospitais na região.	77
Figura 34 – Identificação dos abrigos localizados à direita do rio	77
Figura 35 – Identificação dos abrigos localizados à esquerda do rio	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cenários da modelagem	42
Tabela 2 – Valores obtidos para as brechas	42
Tabela 3 – Vulnerabilidade Social	58
Tabela 4 – Densidade Demográfica	59
Tabela 5 – Integração de Vias	61
Tabela 6 – Vulnerabilidade de Evacuação	63
Tabela 7 – Total de pessoas a ser evacuado	64
Tabela 8 – Capacidade dos alojamentos localizados à direita do rio	65
Tabela 9 – Capacidade dos alojamentos localizados à esquerda do rio	66
Tabela 10 – Relação entre distância percorrida, duração de viagem e quantidade de pessoas atendidas por rota	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Critérios segundo EMS- 98	34
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIDR	<i>Australian Institute for Disaster Resilience</i>
ANA	Agência Nacional de Águas
ASA	Articulação do Semiárido Brasileiro
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CENAD	Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres
ICOLD	<i>International Commission on Large Dams</i>
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
MDE	Modelo Digital de Elevação
PNPDEC	Política Nacional de Proteção e Defesa Civil
SRH	Secretaria dos Recursos Hídricos
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
ZAS	Zona de Autossalvamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2	PROBLEMA DE PESQUISA	18
1.3	OBJETIVOS	19
<i>1.3.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	19
<i>1.3.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	SEGURANÇA NOS VALES A JUSANTE	20
<i>2.1.1</i>	<i>Zoneamento de Risco</i>	23
2.2	SIMULAÇÃO DA CHEIA INDUZIDA	25
<i>2.2.1</i>	<i>Brecha de Ruptura</i>	26
<i>2.2.2</i>	<i>Modelagem</i>	27
<i>2.2.3</i>	<i>Topografia</i>	28
2.3	PLANEJAMENTO DA EVACUAÇÃO	28
<i>2.3.1</i>	<i>Vulnerabilidade Regional</i>	29
<i>2.3.1.1</i>	<i>Dados Quantitativos</i>	30
<i>2.3.1.2</i>	<i>Dados Qualitativos</i>	33
<i>2.3.2</i>	<i>Pontos de Encontro</i>	33
<i>2.3.3</i>	<i>Rotas de Fuga</i>	36
3	METODOLOGIA	39
3.1	ÁREA DE ESTUDO	39
3.2	VULNERABILIDADE REGIONAL	40
<i>3.2.1</i>	<i>Modelagem da Ruptura</i>	41
<i>3.2.2</i>	<i>Determinação dos parâmetros</i>	43
<i>3.2.3</i>	<i>Cálculo dos Indicadores</i>	44
<i>3.2.3.1</i>	<i>Indicador de Vulnerabilidade Social (IVS)</i>	45
<i>3.2.3.2</i>	<i>Indicador de Densidade Demográfica (IDD)</i>	46
<i>3.2.3.3</i>	<i>Indicador de Integração de Vias (IIV)</i>	47
<i>3.2.3.4</i>	<i>Indicador de Vulnerabilidade de Evacuação (IVE)</i>	51
3.3	PONTOS DE ENCONTRO	52

3.4	ROTAS DE FUGA	53
4	RESULTADOS	55
4.1	MODELAGEM DA RUPTURA	55
4.2	VULNERABILIDADE REGIONAL	56
4.2.1	<i>Zona de Autossalvamento (ZAS)</i>	57
4.2.2	<i>Vulnerabilidade Social</i>	57
4.2.3	<i>Densidade Demográfica</i>	59
4.2.4	<i>Integração das Vias</i>	60
4.2.5	<i>Vulnerabilidade de Evacuação</i>	63
4.3	ABRIGOS	64
4.4	ROTA DE FUGA	66
5	CONCLUSÕES	70
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
	REFERÊNCIAS	73
	APÊNDICES	77
	APÊNDICE A – LOCALIZAÇÃO DOS ABRIGOS	77
	APÊNDICE B – ROTAS DE FUGA	79
	ANEXOS	79
	ANEXO A – VULNERABILIDADE DAS EDIFICAÇÕES	80

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Ao longo da história da sociedade, é possível perceber a importância da água para a fixação e o desenvolvimento de civilizações que, não só devido às necessidades básicas, buscavam a proximidade dos rios como uma forma de facilitar o armazenamento de água, a irrigação de culturas, o transporte de pessoas e bens e, portanto, de intensificar o comércio local. Entretanto, como dito por Almeida (1997), em contrapartida aos benefícios listados, sempre houve um risco associado aos eventos naturais de cheias, os quais representam ameaças para as comunidades ribeirinhas.

Além disso, devido a sua importância para a manutenção da vida, um dos principais desafios da humanidade tem sido a garantia de fornecimento de água de qualidade para a população, visto que nem todas as regiões do mundo possuem oferta abundante, seja devido aos problemas da escassez motivados pelo mal uso desse recurso ou pelas características climáticas da região.

O Nordeste brasileiro, por exemplo, é caracterizado pelo clima semiárido, apresentando elevada variabilidade temporal e espacial de chuva, bem como taxas médias anuais de precipitação de 200 mm a 800 mm. Porém, por possuir um índice de evaporação anual bem maior, de aproximadamente 3.000 mm, manifesta deficiência hídrica. Além disso, suas características geotécnicas não favorecem o armazenamento subterrâneo de água, pois há a predominância de solos cristalinos e de pequena profundidade (ARTICULAÇÃO DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO (ASA), 2017).

Devido às dificuldades de gestão da água para aqueles que vivem da agricultura e da pecuária, bem como para o desenvolvimento econômico de algumas localidades, principalmente, como mencionado por Campos e Studart (2001), daquelas que não possuíam infraestrutura de reserva adequada, a oferta desse recurso vem sendo, ao longo dos anos, causa de atenção e de implementação de projetos públicos baseados em obras de açudagem datadas do final do século XIX, tendo como exemplo a construção do açude Cedro no município de Quixadá- CE (MARENGO, 2007).

Assim como a regularização de cheias e a seca estimularam o investimento em açudes no Brasil, segundo OLIVEIRA (2018) desde o final do século XIX, baseando-se no contexto mundial, o país aderiu à hidreletricidade, motivada pela abundância de recursos, e intensificou-se

a construção de barragens, além do investimento feito pela indústria de extração mineral para a contenção dos rejeitos provenientes. Contudo, apesar da construção dessas estruturas prover benefícios para a sociedade, há a ameaça constante de um possível rompimento gerar uma cheia catastrófica no vale a jusante, podendo ocasionar perdas sociais, econômicas e ambientais (ALMEIDA, 1997).

Um acidente ocasionado pelo rompimento de uma barragem apesar de ser incomum, como mencionado por Viseu e Almeida (2011), possui um elevado dano potencial associado, sendo justificado tanto pelo armazenamento de grande volume de água ou de rejeito (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA), 2016a), como também pelo crescimento iminente e desordenado da população e da economia local, resultando no aumento da ocupação e da vulnerabilidade de áreas a jusante dessas estruturas (GHESQUIERE *et al.*, 2017).

Devido a isso, ao envelhecimento das estruturas existentes no território brasileiro, à influência de políticas internacionais e às falhas em barragens nacionais como a do açude Orós (CE), em 1960, e a da barragem de Camará (PB), em 2004, houve um estímulo à elaboração da Lei Nº 12.334/2010 que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB).

O referido documento propõe como um de seus instrumentos o Plano de Segurança de Barragem (PSB) que, sendo elaborado pelo empreendedor, deve conter, em casos de barragens classificadas como dano potencial associado alto, o Plano de Ação Emergencial (PAE), estabelecendo as ações a serem executadas em caso de situação de emergência, abrangendo desde a identificação de condições de mau funcionamento, até a determinação de medidas estratégicas de alerta e de resposta rápida às comunidades mais frágeis e mais afetadas (ANA, 2016b).

Tendo ciência de que os diferentes setores do vale a jusante podem responder de uma forma diferente ao desastre por causa do desigual acesso aos sistemas básicos, foram levantadas as seguintes questões: *Quais parâmetros podem ser usados para representar a vulnerabilidade da região e de que maneira podem ser relacionados os indicadores de vulnerabilidade?*

Assim, salvos os casos em que se pode haver um controle ainda nas primeiras fases de operação da estrutura, quando acontecem eventos extremos que causam a falha da barragem e, por consequência, tempos de alerta e de resposta curtos, há a necessidade de evacuação efetiva e rápida para tentar minimizar as consequências do desastre (KEYS, 1992), baseando-se no planejamento de rotas de fuga e determinação de pontos de encontro (BALBI, 2008).

Para entendimento desse processo, foram elencadas as duas últimas questões motivadoras: *Como garantir a comunicação entre os atores durante o resgate?* e *Quais critérios*

podem ser levados em consideração para a determinação de locais seguros para os pontos de encontro?

Assim, é necessário que haja a elaboração prévia de métodos de planejamento e de operação de evacuação, de acordo com a simulação da área de inundação em caso de rompimento da estrutura, analisando, além das características populacionais, a velocidade da onda proveniente da barragem, as áreas que serão afetadas e o tempo requerido para a fuga, principalmente daqueles que vivem na chamada Zona de Autossalvamento (ZAS) e que não conseguem esperar pelas ações da Defesa Civil (*AUSTRALIAN INSTITUTE FOR DISASTER RESILIENCE* (AIDR), 2009).

É importante destacar, porém, que apesar das imposições legislativas tanto por parte da PNSB como pela Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), chamou-se atenção no Brasil para o desastre com a barragem Mina Córrego do Feijão ocorrido na cidade de Brumadinho (MG) que vitimizou muitas pessoas, principalmente devido à falta de orientações para evacuação (BRASIL, 2019).

Diante disso, entende-se que ainda existe carência em relação à construção do plano de evacuação de áreas de risco, desde a orientação da população até o traçado de rotas de fuga, sendo relevante o estudo de métodos que diminuam a subjetividade das ações de operação e que aloquem de forma otimizada recursos para a diminuição das vulnerabilidades (BRITO JUNIOR *et al.*, 2014).

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

O planejamento de evacuação em caso de desastres naturais é um assunto amplamente estudado internacionalmente, principalmente em países que são vulneráveis a esse tipo de acontecimento. Porém, no território nacional, devido a sua localização privilegiada, pouco é falado sobre gestão de risco e de emergência.

Contudo, a ruptura de uma barragem é considerada um desastre devido à magnitude dos danos causados à propriedade e às pessoas e, no Brasil, além de existir uma grande concentração de barragem nos estados, há uma grande ocupação dos vales a jusante dessas estruturas, aumentando a vulnerabilidade regional e o dano potencial associado a esses empreendimentos.

Nesse contexto, tanto a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) como a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) surgem como fomentadores de uma educação de segurança, obrigando os empreendedores e os órgãos responsáveis a garantirem a

manutenção estrutural desses empreendimentos e a preservação da população, em caso de falha, por meio de ações de resposta.

Sendo assim, devido à quantidade de barragens existentes no país e à dificuldade de obtenção de parâmetros relevantes para o estudo de vulnerabilidade para a escolha de rotas de fuga em caso de ruptura de barragem, fica evidente a complexidade do trabalho dos empreendedores e órgãos responsáveis no planejamento objetivo da evacuação.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é propor uma metodologia para o traçado de rotas de fuga em caso de rompimento de barragem.

1.3.2 Objetivos Específicos

- (a) Verificar a vulnerabilidade dos setores censitários da região em estudo;
- (b) Determinar, por meio da mancha, as áreas a serem evacuadas;
- (c) Escolher potenciais locais de abrigo em caso de desastre;
- (d) Identificar as rotas que permitirão a fuga para os abrigos em tempo hábil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente tópico apresentará a revisão de conceitos e de propostas de estudos com especificidade nos temas de segurança de barragens e gestão de risco, apresentando caracterização das situações que podem acionar os níveis de resposta; determinação das zonas de risco; estudo e modelagem da cheia induzida para barragem de terra, bem como planejamento da evacuação com ênfase nos critérios que influenciam a vulnerabilidade regional, a escolha dos abrigos e a determinação das rotas de fuga.

2.1 SEGURANÇA NOS VALES A JUSANTE

As barragens, incluindo o reservatório e estruturas associadas, se constituem em empreendimentos importantes para a devida gestão dos recursos hídricos e contenção de rejeitos, podendo variar quanto ao tamanho, ao material de constituição e à finalidade (ANA, 2016c).

Como apresentado pelo Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB) (2013), essas estruturas podem ser destinadas a uma única finalidade, sendo chamadas de "barragens de função única", mas também podem ser usadas para diversos fins, conhecidas como "barragens de uso múltiplo", que englobam irrigação, hidroeletricidade, abastecimento humano e industrial, navegação, piscicultura e controle de cheias (*INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD)*, s.d).

Apesar dos benefícios mencionados e do significado tecnológico, é importante destacar, porém, que a construção e a operação dessas estruturas está associada a possíveis danos às cidades no entorno em caso de falha, causando prejuízos diretos, como vitimação da população e danos às propriedades das áreas atingidas e do próprio açude, bem como prejuízos indiretos como resultado do encerramento das atividades produtivas, da impossibilidade de usufruir dos recursos naturais e dos danos psicológicos e físicos dos sobreviventes (MENESCAL *et al.*, 2005).

Assim, a partir do final da década de 60, os países começaram a propor regulamentos e manuais de segurança, levando em conta não só a estrutura física do barramento, como também os efeitos nos vales a jusante, chamando atenção para sistemas de aviso prévio e procedimentos de evacuação da população (ALMEIDA, 1997).

Na década de 90, houve o desenvolvimento de trabalhos voltados para a segurança dos vales a jusante, com ênfase em procedimentos estratégicos de alerta, de comunicação e de

treinamentos de resposta, baseado nos estudos de mancha de inundação e de áreas vulneráveis, introduzindo os Planos de Ação de Emergência (BALBI, 2008).

No Brasil, a Lei Nº 12.334/2010 (PNSB) prevê, após alterações propostas pela Lei Nº 14.066/2020, a elaboração do PAE para barragens classificadas como de médio e de alto dano potencial associado ou de alto risco, a critério do órgão fiscalizador, e, ainda, ressalta que para barragens destinadas à acumulação de rejeitos de mineração, independente da classificação quanto ao dano associado, a elaboração do PAE é obrigatória.

A ruptura de uma barragem se constitui em um desastre, podendo ser causada por eventos adversos, naturais ou humanos. Devido a isso, é importante que à construção de uma barragem esteja sempre associado um plano de inspeção e de segurança confiável, para que se possa assegurar a integridade da estrutura e a segurança da população vulnerável. Como exposto por Almeida (1997), deve haver um sistema de segurança baseado em três pilares:

- Técnico-Operacional: Corresponde ao controle da segurança estrutural e operacional da barragem durante toda a vida útil da obra;
- Monitoração-Vigilância: Corresponde ao processo de inspeção regular, que pode ser quantitativa e qualitativa, para acompanhamento da integridade da estrutura, da necessidade de manutenção e da classificação do risco;
- Gestão do risco-emergência: Corresponde a elaboração dos Planos de Segurança de Barragem, dos Planos de Ação Emergencial e dos Planos de Contingência para a determinação das ações a serem executadas em caso de emergência.

Em casos extremos, quando não se consegue haver uma intervenção rápida o suficiente para impedir a ruptura, a preparação para responder à emergência se torna uma solução necessária para diminuir as dificuldades relativas à coordenação do desastre, as perdas de vidas humanas e de bens (LIMA; OLIVEIRA, 2014). Para isso se tornar viável, porém, deve existir uma gestão cíclica do risco, considerando, como apresentado na Figura 11, as quatro fases principais:

- Prevenção: De acordo com Balbi (2008), tem o objetivo de impedir o desastre. Pode ser feita por meio de monitoramento e recuperação da estrutura por parte do empreendedor, bem como de planejamento operacional em caso de emergência, além de estudo de áreas de risco, uso e ocupação do solo e conscientização e treinamento da população a jusante pela Defesa Civil.
- Preparação: Deve ser feita junto à prevenção, atuando na diminuição da vulnerabilidade

da região. É importante a elaboração dos Planos de Ação Emergencial e de Contingência, bem como o mapeamento das áreas de risco e a implementação de sistemas de alerta. As ocorrências excepcionais na barragem devem ser comunicadas aos demais atores (BALBI, 2008).

- Resposta: Emergência declarada e acidente iminente. São dados os avisos e diretrizes para evacuar a região e socorrer as vítimas em locais seguros e com acesso à suprimentos básicos para sobrevivência (POZZER *et al.*, 2014).
- Reconstrução: Após a situação da emergência, deve haver a recuperação do que foi atingido, a restauração dos serviços básicos (água, luz, comunicação) e a reconstrução de bens destruídos e, até mesmo, da própria estrutura do barramento (BALBI, 2008).

Figura 1 – Ciclo de fases da gestão de risco



Fonte: Autora (2020)

Para possibilitar o início dos processos de emergência e facilitar a tomada de decisão por parte do empreendedor, é necessário que seja feita a classificação das situações de risco como proposto pela ANA (2016b), levando em consideração uma escala de cores (verde, amarelo, laranja e vermelho) para cada nível de gravidade, como demonstrado na Figura 2.

Por serem ações que implicam a necessidade de atuação de agentes especializados, é importante que haja uma integração entre empreendedor e agentes externos, como líderes

comunitários e agentes da Defesa Civil, para que a intervenção aconteça de forma mais organizada e efetiva, determinando os níveis de atuação e a fase de intervenção sob a responsabilidade de cada órgão.

Figura 2 – Caracterização genérica das situações que acionam os diversos níveis de resposta

Nível de Resposta	Situação
VERDE	Situações de incidente declarado ou previsível, com as seguintes características: i) serem estáveis ou que se desenvolvem muito lentamente no tempo; ii) poderem ser controladas pelo Empreendedor; iii) poderem ser ultrapassadas sem consequências nocivas no vale a jusante.
AMARELO	Situações que impõem um estado de atenção na barragem e/ou no vale a jusante, inclusive no caso em que a magnitude da vazão afluyente ao reservatório exija a liberação de vazão efluente superior às condições de restrição a jusante (cotas ou vazões limites impostas para evitar inundação de habitações ou infraestruturas importantes). As características principais são: i) a situação tende a progredir lentamente, permitindo a realização de estudos para apoio à tomada de decisão; ii) existe a convicção de ser possível controlar a situação, embora o coordenador do PAE possa vir a necessitar de assistência especial de entidades externas; iii) existe a possibilidade de a situação se agravar e de se desenvolverem efeitos perigosos no vale a jusante sobre pessoas e bens.
LARANJA	Situações que impõem um estado de alerta geral na barragem. As características principais deste nível de resposta são as seguintes: i) a situação tende a progredir rapidamente, podendo não existir tempo disponível para a realização de estudos para apoio à tomada de decisão; ii) admite-se não ser possível controlar o acidente, tornando-se indispensável a intervenção de entidades externas; iii) existe a possibilidade de a situação se agravar com a ocorrência de consequências muito graves no vale a jusante.
VERMELHO	Situação de catástrofe inevitável, incluindo o início da ruptura da barragem.

Fonte: ANA (2016b)

No caso específico da gestão de segurança de barragens, existem delimitações de funções, propostas na legislação, para o empreendedor e para os agentes da Defesa Civil que leva em consideração, principalmente, a localização do acidente e o zoneamento de risco.

2.1.1 Zoneamento de Risco

Todas as ações descritas no Plano de Ação de Emergência e no Plano de Contingência são baseadas no estudo das áreas de risco, tanto para a definição dos agentes responsáveis pelas medidas de evacuação e resgate, como para que seja possível definir aqueles locais seguros para resguardar a população evacuada durante o incidente.

O zoneamento de risco possui diversas classificações de acordo com as legislações federais e depende do tempo de chegada da onda que permite estimar o período necessário para a evacuação (VISEU; ALMEIDA, 2011). No Brasil, a Lei Nº 12.334/2010 apresenta duas categorias para o zoneamento a jusante das barragens:

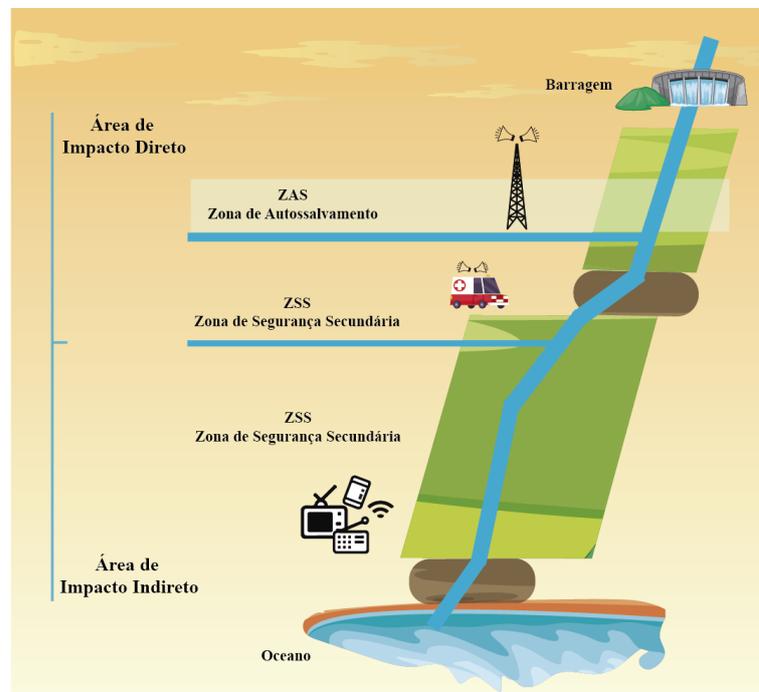
1. ZAS (Zona de Autossalvamento): Corresponde à área em que o aviso à população é de responsabilidade do empreendedor e a forma mais eficaz de segurança é o autossalvamento,

pois, devido à proximidade, não há tempo suficiente para a chegada das autoridades. De acordo com a Resolução nº 236/2017, pode ser definida como o trecho de 10 km a partir do pé da barragem ou a distância referente ao tempo de chegada de onda de 30 minutos (ANA, 2017).

2. ZSS (Zona de Segurança Secundária): Corresponde ao trecho constante do mapa de inundação que não é classificado como ZAS.

Por sua vez, de acordo com Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD) (2016), pode-se classificar as zonas a jusante da barragem como Área de Impacto Direto, que caracteriza as regiões atingidas por material extravasado fora da calha do rio, representando ameaça para a população; e como Área de Impacto Indireto aquelas regiões que não necessitam de atuação emergencial das autoridades, visto que nessa região o material já segue o curso na calha do rio, devendo haver ações de recuperação ambiental e assistência humanitária devido à possibilidade de contaminação do rio e à consequente interrupção do abastecimento e da produção local.

Figura 3 – Zoneamento de risco proposto pela PNSB e pelo CENAD.



Fonte: Adaptada de (VISEU, 2006)

Independente da classificação discutida e ilustrada na Figura 3, a principal decisão em face do zoneamento é a definição, por parte dos empreendedores e da Defesa Civil, das ações de evacuação e de notificação a serem seguidas, principalmente, pelos moradores da ZAS. Pelo

fato de não haver tempo suficiente para intervenção, nessa região devem existir sistemas de alerta e rotas de fuga bem delimitadas e sinalizadas para nortear o autossalvamento da população.

Cabe ressaltar, porém, que o empreendedor da barragem é o responsável não só pelas ações na estrutura, como também pela ZAS e deve prover os mecanismos necessários para salvaguardar a população. As demais zonas ficam sob responsabilidade, no momento do desastre, de agentes externos, mas todas devem ser definidas a partir de uma simulação de cheia induzida.

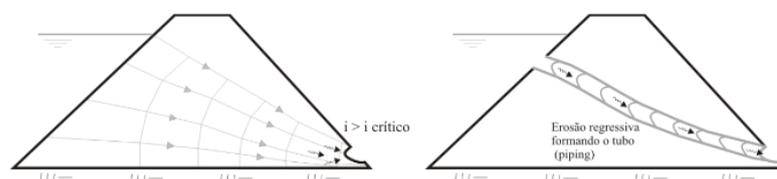
2.2 SIMULAÇÃO DA CHEIA INDUZIDA

A cheia induzida pode ser entendida como uma cheia provocada por situações que comprometam a operação normal da barragem, sejam elas danos estruturais ou descargas sem controle que possam impactar os vales a jusante (VISEU, 2006). Por ser um evento adverso, sua caracterização deve ser feita por meio de simulação computacional para que se possa planejar as ações de emergência.

O estudo de ruptura de barragens deve analisar as condições à que a estrutura pode estar sujeita. Essas condições dependem do tipo de barragem e podem acontecer de forma gradual ou súbita, implicando no tempo de resposta. Normalmente, a análise é feita a partir da consideração dos dois casos mais comuns de ruptura, que são:

1. *Piping*: Erosão no maciço ou na fundação da barragem que pode ser causada pela percolação excessiva de água e o carreamento de material, como ilustrado na Figura 4. A erosão regressiva provocada forma um "tubo" por meio do qual há o transporte das partículas, ocasionando a desintegração da estrutura (OLIVEIRA, 2018).

Figura 4 – Processo de formação de *piping* por erosão regressiva

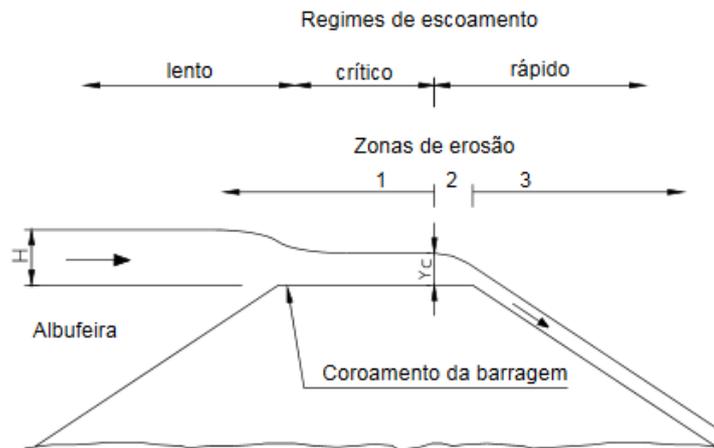


Fonte: (PERINI, 2009)

2. Galgamento: Ocorre quando o nível de material acumulado se eleva além da cota do coroamento da barragem, como ilustrado na Figura 5, e pode ser causado por chuvas intensas superiores à capacidade do vertedouro ou pela ruptura de alguma barragem a montante, de tal modo que a barragem não suporte o volume afluente (ANA, 2013).
A duração da ruptura de uma barragem depende da altura e do material de construção

do barramento, do nível de compactação do solo e da intensidade e da duração do fluxo escoado. Porém, como dito por Perini (2009), o volume e a dimensão da cheia são ditados pelo tamanho da brecha formada como resultado de processos erosivos.

Figura 5 – Zonas de regime de escoamento e zonas de erosão durante o galgamento de uma barragem de aterro.



Fonte: (FRANÇA, 2002)

Assim, a ruptura deve ser analisada, como proposto por Perini (2009), em duas etapas: a primeira constitui a análise da abertura da brecha e a segunda é dada pela delimitação da rota percorrida pelo fluxo até atingir as comunidades a jusante, possibilitando o conhecimento "do tempo de chegada da frente de onda, da cota máxima de água, e do tempo de ocorrência desta após o instante do acidente e ao longo do vale do rio a jusante"(ALMEIDA, 1997).

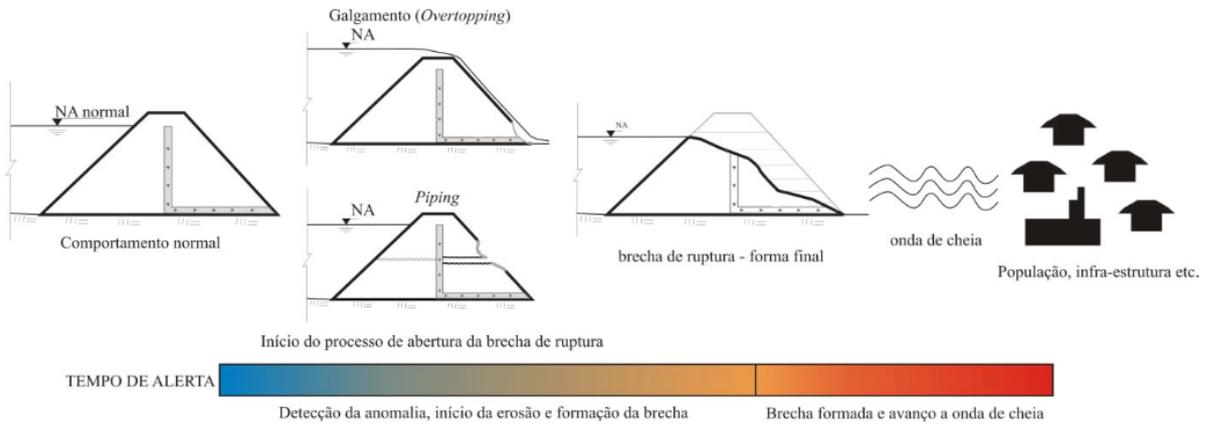
2.2.1 Brecha de Ruptura

Entende-se por brecha de ruptura a abertura formada na parede da barragem vitimada por processos erosivos, sejam eles frutos de galgamento ou de percolação. Dependendo do tipo de acidente, a brecha possui configurações diferentes.

Na fase inicial da brecha não há rompimento da estrutura, visto que o fluxo de água ainda é pouco e pode ser interrompido mediante ações na estrutura. Havendo a permanência do desgaste, a erosão e o fluxo crescem rapidamente, tornando a ruptura iminente (PERINI, 2009).

No que concerne à etapa de Resposta, o tempo de iniciação da brecha é uma informação importante, pois revela o tempo disponível para que as medidas de evacuação sejam realizadas. A Figura 6 ilustra o processo, desde a abertura da brecha até a chegada da onda no vale a jusante da barragem.

Figura 6 – Processo de abertura da brecha e formação da onda em relação ao tempo disponível para as ações de resposta.



Fonte: (PERINI, 2009)

É importante salientar, ainda, que a existência de barragens em cascata pode atenuar os danos causados pela ruptura de uma das barragens situadas mais a montante. "Com efeito, as barragens a jusante podem ir sendo destruídas pela passagem da onda de cheia, sobrepondo-se, assim, os efeitos de sucessivas rupturas em cadeia"(ALMEIDA, 1997).

2.2.2 Modelagem

É sabido que a modelagem da simulação de ruptura de barragem tem sido, ao longo dos anos, alvo de várias pesquisas. Assim, atualmente, existem diversos modelos que diferem desde a dificuldade de manuseio, até a precisão da simulação, como mostrado na Figura 7, de acordo com o exposto por Lauriano (2009).

Figura 7 – Classificação dos modelos de simulação do escoamento por escala de precisão, segundo Lauriano (2009).



Fonte: Autora (2020)

Além dos modelos hidrodinâmicos unidimensionais e bidimensionais, existem os modelos físicos que, apesar de mais precisos, demandam uma maior complexidade, e os modelos simplificados. Estes, por sua vez, são menos precisos por considerarem poucos parâmetros de entrada e uma baixa complexidade computacional (OLIVEIRA, 2018).

Para a simulação de ruptura necessária à elaboração do PAE, deve haver um rigor maior na seleção de dados de entrada, bem como na modelagem, fazendo que os modelos simplificados não sejam levados em consideração para tal, com exceção de barragens classificadas com dano potencial associado alto e cujas características físicas de altura do barramento e de capacidade não excedam 15 m e 3 hm³, respectivamente (ANA, 2016b).

Além disso, para casos em que há a análise de ruptura em cascata, o modelo simplificado MS-20S não se aplica (OLIVEIRA, 2018). Assim, normalmente, para casos práticos, o mais aplicado é o modelo hidrodinâmico unidimensional realizado no *software* de domínio público HEC-RAS.

2.2.3 Topografia

Visto que a simulação da ruptura tem como um dos principais objetivos delimitar a região que deve ser evacuada em caso de emergência, é necessário que haja a adequação dos estudos hidrodinâmicos com a topografia da região, atentando-se à importância da precisão dos dados para que se possa obter uma simulação condizente com a realidade.

De acordo com Oliveira (2018), para o desenvolvimento de Planos de Ação de Emergência (PAE), os dados topográficos devem ser bastante precisos, sendo necessário que haja um levantamento topobatimétrico das seções transversais ao rio para melhor representação. No entanto, por se tratar de áreas muito extensas e de procedimento de elevado custo, nos casos em que o citado estudo é inviável, há a possibilidade de usar o modelo digital de elevação (MDE) fruto de imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) (ANA, 2016b).

2.3 PLANEJAMENTO DA EVACUAÇÃO

Segundo Scheer *et al.* (2011), um Plano de Evacuação é um documento que deve ser elaborado para que, durante e após a notificação da emergência, seja usado para nortear as ações de fuga e de resgate de forma segura, levando em consideração as características do desastre e visando sempre salvar vidas.

No caso de desastres causados por tsunamis, por exemplo, deve-se ter o objetivo de sempre guiar as pessoas para locais seguros, pontos de encontro ou locais de abrigo, bem como priorizar a rapidez das ações de acordo com a distância a ser percorrida e com o período de tempo entre o alarme e a chegada da primeira onda (SCHEER *et al.*, 2011).

No estudo feito por Maraboti *et al.* (2018), houve a comparação entre as respostas ao vazamento nuclear de Chernobyl, ao furacão Katrina, ao vazamento nuclear da usina de Fukushima e ao rompimento da barragem em Mariana, considerando-se também a necessidade da organização das 4 etapas (alarme, retirada, abrigo e retorno).

Com isso, concluiu-se que a fase de comunicação e alarme pode acontecer imediatamente (Katrina e Fukushima) ou atrasado (Chernobyl e Mariana), de acordo com interesses envolvidos; notou-se, na fase de evacuação, a importância de equipes especializadas no local e a presença de veículos coletivos. Já com relação aos abrigos, houve a procura por casa de familiares, por locais públicos como estádios, ginásios e alojamentos temporários, bem como por pousadas e hotéis (MARABOTI *et al.*, 2018).

De acordo com o Manual de Planificação de Evacuação por Tsunami, o plano de evacuação pode ser organizado em 3 etapas:

1. Planejamento e obtenção das interações para conhecimento da extensão do risco, das áreas seguras e do estudo do tempo de evacuação mediante simulações computacionais e elaboração dos mapas (SCHEER *et al.*, 2011);
2. Sinalização dos locais de apoio, como abrigos e rotas de fuga, bem como preparação e treinamento da população (SCHEER *et al.*, 2011);
3. Ação da resposta durante a ocorrência do desastre (SCHEER *et al.*, 2011).

Contudo, para que se consiga estabelecer os procedimentos e as áreas seguras para evacuar a população, é importante levar em consideração não somente o foco e a proporção do desastre, como também os parâmetros que influenciam a vulnerabilidade social e regional.

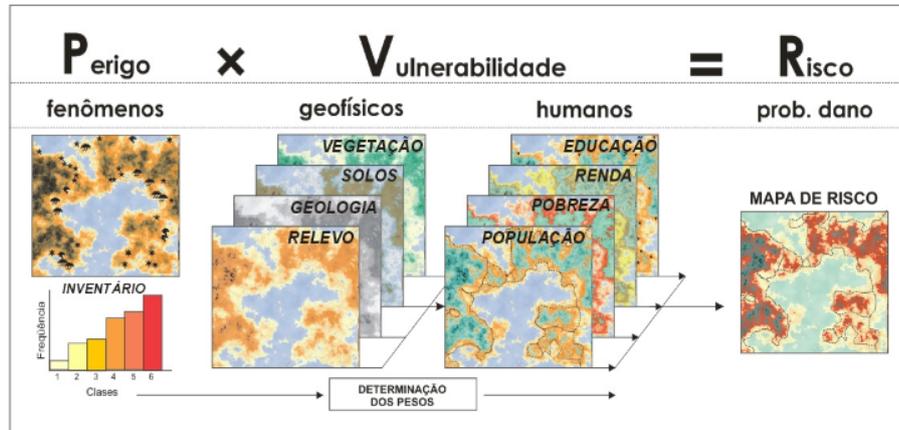
2.3.1 Vulnerabilidade Regional

Segundo Amaral *et al.* (2007), a vulnerabilidade pode ser definida como:

"conjunto de condições determinadas pelos fatores físicos, sociais, econômicos e ambientais que aumentam a suscetibilidade da população e de bens e propriedades ao impacto dos perigos, incluindo tanto os aspectos físicos, relacionados à resistência de construções e proteções decorrentes da existência de infraestrutura, como fatores humanos relacionados aos aspectos econômicos, sociais, políticos, técnicos, ideológicos, culturais, educacionais, ecológicos e institucionais [...]"

Para Pinho *et al.* (2019), quando relacionada à procedimentos de evacuação, pode ser analisada mediante a utilização de indicadores que representam não só a exposição ao desastre, como também a capacidade de resposta da população, levando em consideração, por exemplo,

Figura 8 – Questões necessárias para análise e mapeamento das áreas de risco.



Fonte: (MARCELINO, 2008)

o número de evacuados, a forma urbana e seus graus de integração e, por consequência, a acessibilidade.

É importante destacar que esses parâmetros podem ser desde dados quantitativos provenientes de censos feitos pelo governo, como por dados qualitativos obtidos mediante pesquisas de campo e que, pelo fato de análise geralmente ser feita a nível municipal, é necessário que os dados sejam organizados por unidade menores e mais detalhadas, como setores censitários ou, caso seja viável para o estudo, como quadras (PINHO *et al.*, 2019).

2.3.1.1 Dados Quantitativos

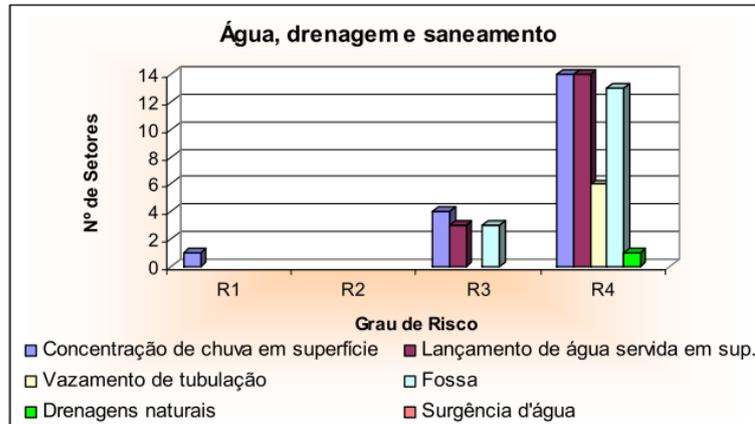
A vulnerabilidade de uma região está bastante relacionada ao aumento desordenado da ocupação e ao mau uso do solo, mediante a falta de planejamento urbano para o desenvolvimento de determinadas localidades.

Isso geralmente acontece como fruto do desemprego e da baixa renda, fazendo que haja a construção de imóveis, geralmente estruturalmente precários, em locais que não possuem sistemas de infraestrutura e planejamento adequados ou em áreas de difícil evacuação por causa da existência de vias estreitas e da construção excessiva de condomínios em vias de tráfego intenso (SILVA JUNIOR, 2018; CELORIO-SALTOS *et al.*, 2018).

No que tange ao acesso a sistemas básicos de infraestruturas, Pinho *et al.* (2019) e Amaral *et al.* (2007) mostram que a precariedade das modalidades dos serviços pode afetar a estabilidade da região. Por exemplo, quando há uma falha na drenagem superficial ou o acúmulo de resíduos sólidos e de dejetos sanitários é possível que ocorra saturação do solo, contaminação dos lençóis freáticos, erosão e desestabilização de encostas, além da exposição

dos indivíduos a doenças (PINHO *et al.*, 2019; AMARAL *et al.*, 2007; CELORIO-SALTOS *et al.*, 2018; FELTRIN, 2014).

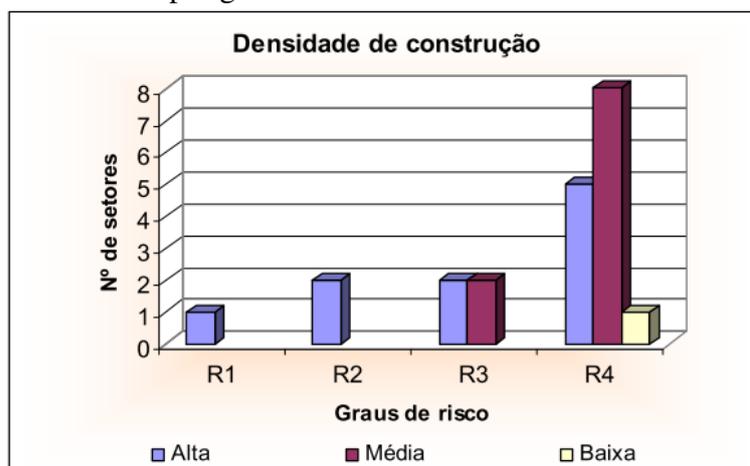
Figura 9 – Número dos setores e dinâmica de água e efluente por grau de risco.



Fonte: (AMARAL *et al.*, 2007)

Na análise feita por Amaral *et al.* (2007) por exemplo, pôde-se concluir que os setores classificados como de risco alto e muito alto (R3 e R4) estavam localizados em zonas de expansão desordenada, caracterizadas por densidade de construção média (entre 30 e 70%), bem como pela deficiência ou ausência de infraestrutura, como sistema de drenagem e esgotamento sanitário, favorecendo a instabilidade do terreno, como apresentado nas Figuras 9 e 10.

Figura 10 – Número dos setores e densidade de construção por grau de risco.



Fonte: (AMARAL *et al.*, 2007)

Em se tratando de sistemas básicos, pode-se citar: acesso à rede de abastecimento de água e de energia elétrica; acesso ao sistema de esgotamento sanitário; acesso à coleta de lixo; acesso à sistema de comunicação. No caso de acesso à rede elétrica e ao sistema de comunicação,

ambos são de extrema importância para a resposta durante o desastre, visto que são eles que, durante a fase de resposta, auxiliarão na comunicação e na movimentação dos diferentes atores (CELORIO-SALTOS *et al.*, 2018).

Outro fator igualmente importante é dado pela integração das vias e Pinho *et al.* (2019) propõem seu cálculo pelo índice proposto pela Sintaxe Espacial, analisando aquelas vias que seriam mais acessíveis em caso de necessidade de evacuação. Contudo, como citado pelos próprios autores, não houve a consideração das características físicas do terreno nem de variáveis definidoras como atração devido às atividades econômicas.

Ademais, a variável "renda da população" está bastante relacionada à escolaridade e ao acesso a sistemas sanitários básicos e de saúde. Sendo assim, ela se torna um dos parâmetros importantes que contribuem não só para a análise do nível de fragilidade das pessoas, como também implica na fase de reconstrução pós-desastre (PINHO *et al.*, 2019).

A escolaridade, por sua vez, é um parâmetro definidor das ações de resposta. Por escolaridade pode-se considerar não só o acesso ao sistema educacional e alfabetização, como também a existência de programas emissores de informação e de treinamento, idealizados pelos órgãos responsáveis como a Defesa Civil, em caso de desastres. Sendo assim, casos em que a população não tem acesso a esses serviços ou o acesso é precário, há o enquadramento como elevada vulnerabilidade (PINHO *et al.*, 2019; FELTRIN, 2014; CELORIO-SALTOS *et al.*, 2018; BRITO JUNIOR *et al.*, 2014).

Já a idade e o gênero também implicam no nível de resposta. De acordo com Ghesquiere *et al.* (2017) os desastres impactam desproporcionalmente mulheres, crianças e idosos. Pinho *et al.* (2019) e Trindade (2014) sintetizam que um dos grupos com maior vulnerabilidade seria o das mulheres, com idades menores que 6 anos e maiores que 60 anos.

Por fim, no que tange ao local e à magnitude do desastre, é importante que haja o mapeamento do risco de forma precisa, utilizando ferramentas SIG, para que se consiga identificar o nível de exposição/proximidade com o local do acidente; vias que estarão sujeitas a interdições e aquelas que estarão livres e que comportarão a evacuação em massa; as construções seguras para abrigar as pessoas ou os locais em que será possível, porventura, construir pontos de encontro (CELORIO-SALTOS *et al.*, 2018; AMARAL *et al.*, 2007; FELTRIN, 2014).

2.3.1.2 *Dados Qualitativos*

Para além dos dados físicos dos desastres, a vulnerabilidade social também está relacionada à composição e ao potencial de resposta da população. Sendo assim, no que tange aos dados qualitativos para a análise da vulnerabilidade, muitos estudos propõem a avaliação da comunidade e das instituições por meio de parâmetros conseguidos a partir de pesquisas de campo (BIRKMANN *et al.*, 2011).

Para a avaliação da capacidade de resposta da comunidade, alguns estudos propuseram o levantamento de parâmetros como "conhecimento sobre risco"; "participação de programas de treinamento"; "conhecimento sobre a ocorrência do desastre" e "comportamento frente a ocorrência do desastre" (CELORIO-SALTOS *et al.*, 2018; SILVA JUNIOR, 2018; SORIANO, 2009; ANGGRAINI; OLIVER, 2019).

Já para a avaliação institucional, existiria a necessidade de recolher informações referente a existência de serviços e de equipamentos, como "oferta de programas de treinamento/educação em desastres"; "existência de sistemas de alarme/ sirenes"; "organização das instituições"; "existência de pontos de encontro/ abrigos e rotas de fuga"; "existência de Planos de Contingência" e "existência de brigadas de emergência" (CELORIO-SALTOS *et al.*, 2018; SILVA JUNIOR, 2018; ANGGRAINI; OLIVER, 2019; SORIANO, 2009; SCHEER *et al.*, 2011).

Por fim, um outro dado que pode ser levado em consideração é o uso do solo da região para averiguar a localização dos pontos de atração comercial que possam, porventura, dificultar as ações de evacuação em horários de pico, bem como a localização de hospitais para nortear o transporte de feridos.

2.3.2 *Pontos de Encontro*

Os Pontos de Encontro (PE) podem ser entendidos como os locais para onde as pessoas devem ir em caso de evacuação. Sendo assim, para a localização segura desses pontos, deve-se adequar a tomada de decisões ao estudo de vulnerabilidade da região e de mancha de inundação, pois além de que devem estar, de acordo com CENAD (2016), fora da Área de Impacto Direto, é necessário que neles exista o acesso a insumos e serviços básicos para manter a segurança dos evacuados até que a situação seja estabilizada.

Assim, de acordo com o exposto para tsunamis por Scheer *et al.* (2011), durante a tomada de decisão é importante que os PE suportem uma quantidade mínima de pessoas. Assim,

deve ser levada em consideração a quantidade de pessoas afetadas no local, a localização de estradas de acesso ao PE, a existência de sistemas de serviço de comunicação e de iluminação, bem como de kits de primeiros socorros, de água e de alimentação.

Os abrigos podem ser de dois tipos, de acordo com Scheer *et al.* (2011), sendo eles:

- **Horizontais:** Previamente definidos de forma a satisfazer as necessidades de recepção de um certo número de evacuados que moram em locais de risco elevado e que não possuem construções resistentes à onda. Normalmente, são localizados em zonas não atingidas pela inundação e, durante a escolha, deve ser considerada a capacidade de resposta desses ambientes, visto que pode haver a inundação das vias de acesso.
- **Verticais:** Podem ser vistos como construções tipo edifícios que devem ser classificados conforme sua vulnerabilidade, dependendo do tipo construtivo, da idade e da altura. Esses edifícios podem permanecer rodeados por água e devem suportar danos severos na estrutura por objetos carregados pela onda. Geralmente, são implementados quando as rotas até os abrigos horizontais não permitem uma evacuação em tempo hábil (TRINDADE, 2014).

A determinação da vulnerabilidade das construções é de extrema importância, visto que, durante um desastre, tanto um edifício pode vitimar muitas pessoas caso colapse, como também pode ser usado como abrigo para casos de evacuação.

Assim, Scheer *et al.* (2011), Celorio-Saltos *et al.* (2018) citam um método de classificação dos mesmos baseado no material de construção, no número de pavimentos e na idade dos edifícios. Quadros propostos nos estudos podem ser encontrados no Anexo A. Trindade (2014) adapta os critérios acima às categorias apresentadas na Escala Macrossísmica Europeia (EMS-98) que varia de A (mais vulnerável) a F (menos vulnerável), como apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Critérios segundo EMS- 98

Ano	Qntd Pavimentos	Concreto	Alvenaria	Taipa/Adobe	Outro
Antes de 1919	Todos		B	A	A
1920 a 1960	1 a 4; 5 a 7; + de 8	C	C	A	A
1961 a 1985	1 a 4; 5 a 7	C	C	A	A
1961 a 1985	+ de 8	D	D	A	A
1986 a 2005	1 a 4; 5 a 7; + de 8	D	D	A	A

Fonte: Adaptado de (TRINDADE, 2014).

É importante destacar ainda que, quando a seleção dos abrigos horizontais e verticais não apresenta resultados satisfatórios, existe a possibilidade de serem construídos abrigos

artificiais que podem ser de concreto armado do tipo plataforma aberta ou em formato de monte, respeitando os critérios de acesso e de capacidade (TRINDADE, 2014).

Lavras (2020), em seu estudo, apresenta argumentos satisfatórios contra a utilização de espaços públicos como abrigos para evacuados, apontando que apesar de serem soluções práticas, são extremamente desconfortáveis e não proporcionam bem-estar às famílias. Assim, apresenta algumas formas de construir esses abrigos, mediante os critérios de conforto e segurança.

Quanto ao tipo de construção, Lavras (2020) analisou e comparou 5 tipos de abrigos temporários que foram propostos, variando desde abrigos feitos com materiais reciclados como tubos de papel e fundações em engradados de cerveja, até alojamentos fabricados pela empresa EXO, com capas externas de PVC e revestimento interno de alumínio e versa que a escolha depende tanto de questões ambientais como da relação custo-benefício de cada método.

Com relação às questões ambientais, a análise feita para as respectivas regiões brasileiras permitiu que a autora elencasse as características físicas que os abrigos devem apresentar. No caso da região Nordeste, devido ao clima quente e seco, é necessário que as paredes sejam grossas para evitar desconforto de temperatura; que as janelas sejam pequenas para diminuir a incidência dos raios solares; que as construções sejam próximas de forma a proporcionarem sombra e que a edificação esteja diretamente apoiada sobre o solo para aumentar o conforto térmico (LAVRAS, 2020).

Os abrigos podem ser construídos em espaços descampados ou em locais destinados à recepção das vítimas, como ginásios, devendo responder, de acordo com Lavras (2020), aos seguintes critérios:

1. Tipo de construção e condições topográficas e geotécnicas, atentando-se à necessidade de proximidade com corpos hídricos e se o local é suscetível ao acúmulo de lama;
2. Condições de higiene e prevenção de agentes biológicos, sendo essencial o acesso às lavanderias, banheiros e proteção contra insetos;
3. Existência de infraestrutura adequada com acesso à água, luz, dormitórios e áreas de lazer;
4. Delimitação de um espaço físico por família de aproximadamente 10 m² e área mínima coberta por pessoa de 4 m²;
5. Área entre barracas de 3 m²;
6. Delimitação de 15 m² por fogão de 6 bocas na cozinha de forma que atenda 250 pessoas, bem como de 1,50 m² por pessoa no refeitório;

7. Existência nos banheiros de 1 lavatório para cada 10 pessoas, de 1 vaso sanitário para cada 20 pessoas e 1 chuveiro para cada 25 pessoas;
8. A área de serviço deve ser dimensionada de forma que cada tanque atenda 40 pessoas; área de lazer dimensionada de forma que seja destinado 1,50 m² para cada criança e setor de triagem de 20 m²;
9. Consideração da taxa de consumo de água potável de 2 a 2,50 litros/pessoa/dia e de água para uso geral de 80 litros/pessoa/dia.

2.3.3 Rotas de Fuga

As rotas de fuga podem ser entendidas como as vias que estão aptas física e operacionalmente para permitir a evacuação das vítimas. De modo geral, de acordo com pesquisas feitas, a escolha dessas rotas ainda é um trabalho feito de forma bastante subjetiva e sua definição geralmente está baseada no conhecimento do corpo técnico da Defesa Civil (BRITO JUNIOR *et al.*, 2014; SILVA *et al.*, 2016).

O procedimento de identificação de rotas de fuga pode ser feito por diferentes métodos, utilizando desde cartografia social com enfoque nas pessoas que utilizarão essas vias, até mapeamentos mais precisos que consideram a extensão do desastre e as áreas seguras. Os mapas das rotas devem ser, preferencialmente, do tipo dinâmicos para que haja uma análise flexível o bastante para apoiar as decisões frente à emergência (SCHEER *et al.*, 2011; TRINDADE, 2014).

A cartografia social pode ser tida como um estudo de planejamento participativo ainda na etapa de diagnóstico e se constitui em diálogos com a comunidade local para que possam ser registrados em bases cartográficas os conhecimentos empíricos e as percepções de dinâmica espacial dos moradores. Para isso, são considerados locais que eles acham seguros, bem como caminhos e vias possíveis de serem usadas em caso de evacuação com destino aos locais seguros elencados e validação do mapa de rotas proposto pela Defesa Civil (SILVA *et al.*, 2016).

O entendimento sobre a construção de rotas depende de critérios como determinação do espaço, propósito e nível de detalhe (análise macroscópica, mesoscópica e microscópica). Souza e Kuwer (2019) propõem em seu estudo a utilização do *software PTV Vissim/Viswalk*, ferramenta de análise microscópica, para simulação do plano de evacuação de edifícios e espaços que reúnem grandes públicos para eventos especiais.

Foram feitos dois cenários de simulação para diferentes velocidades, considerando a

velocidade de 1,53 m/s para a situação normal e de 3,33 m/s para a situação de evacuação emergencial. Como conclusão, foi observado que em situações de pânico as velocidades aumentam e os pedestres tendem a seguir o mesmo percurso, sem desvios; o bloqueio e o estrangulamento de circulações geram diminuição da velocidade, aumento da densidade nas rotas e significativos atrasos que poderiam ocasionar em acidentes em uma situação real (SOUZA; KUWER, 2019).

No caso dos modelos macroscópicos, há a utilização de grafos para a modelagem de rotas. Trindade (2014) utiliza a teoria dos grafos para evacuar a região em caso de tsunami, pois há a necessidade de minimizar o custo do deslocamento ao mesmo tempo em que deve maximizar o fluxo de pessoas na rede. Propôs, assim, a modelagem em 5 passos:

1. Criação da rede;
2. Definição de atributos, como os custos e restrições;
3. Identificação das áreas vulneráveis ou não;
4. Localização dos abrigos horizontais;
5. Otimização de rota pelo método CASPER.

Como critérios de modelagem, Trindade (2014) simula a circulação pedonal, excluindo o fluxo de automóveis que podem causar obstrução de vias e ameaça à integridade física dos pedestres. Assim foi necessário desprezar atributos de rede na extensão *Network Analyst* do software ArcGis, como o *Oneway* (sentido único) e como o *Turns* (curvas e mudança de direção), para conferir a liberdade de deslocamento necessária.

Houve, ainda, o acréscimo dos atributos de custo dado como *output* de cada rota, sendo eles os dados de tempo e distância percorrida. Como o tempo depende da velocidade de deslocamento e esta, por se tratar de pedestres, depende do tipo de via. Assim, foi definido que para estradas normais a velocidade seria de 1,04 m/s e para escadas, 0,5 m/s (TRINDADE, 2014).

As rotas foram simuladas tendo por base o centroide da região a ser evacuada e o local do abrigo e são classificadas de acordo com o tempo do percurso, sendo necessário avaliar com base no tempo necessário para a evacuação (TE). O tempo da evacuação é dado pelo período disponível entre a emissão do alerta e a chegada da primeira onda, levando em consideração o tempo de resposta da população e se a rota traçada não permitir a evacuação no tempo hábil, deve ser estudada a locação de abrigos verticais na região (TRINDADE, 2014).

Para o cálculo do TE, Trindade (2014) agregou os tempos de decisão e de notificação,

considerando defeitos, como Tempo de Aviso (TA) que levaria, em média, 8 minutos. O tempo de resposta (TR) das pessoas foi considerado, em média, como 10 minutos e o Tempo de Chegada da Onda (TTT - *Tsunami Travel Time*) foi dado, pela simulação feita, um valor mínimo entre 25 e 30 minutos. A expressão usada é dada abaixo e, tendo sido usado um TTT de 30 minutos, foi obtido um TE igual a 12 minutos.

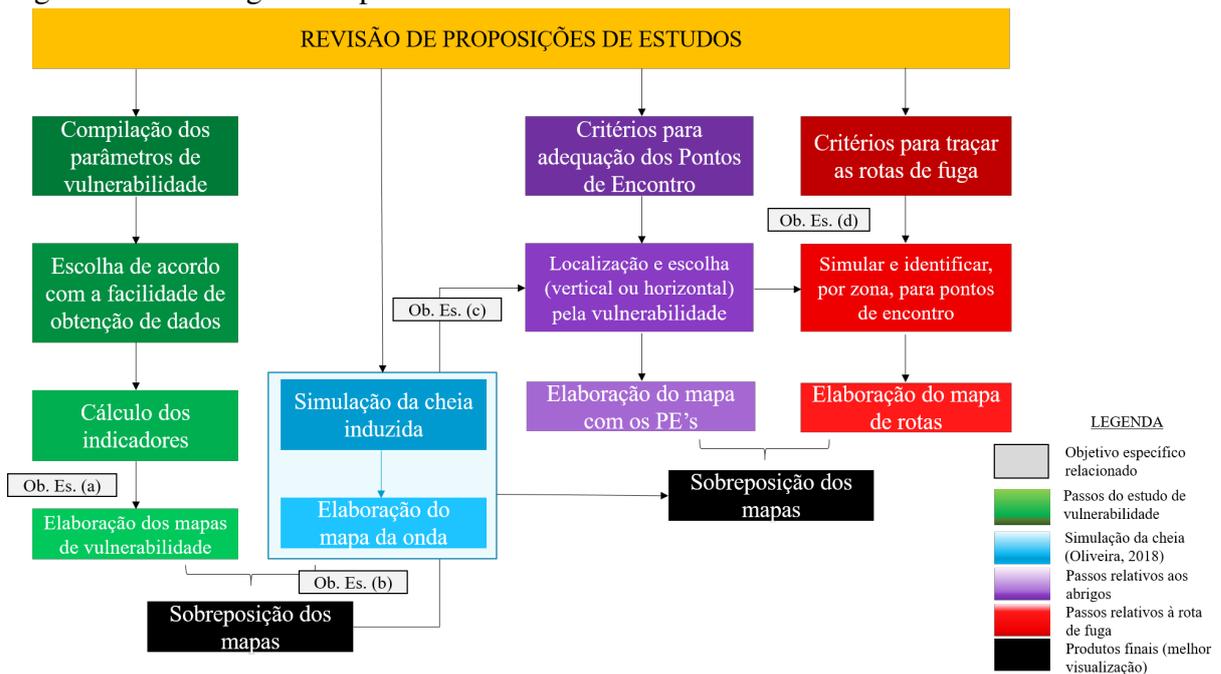
$$TE = TTT - TA - TR \quad (2.1)$$

Trindade *et al.* (2018) usaram um método parecido com o descrito, considerando o cálculo da quantidade de pessoas a serem evacuadas, seguido da localização de abrigos e simulação de rotas. Além disso, foi adotada de forma generalizada a velocidade de 1,4 m/s como o normal para um adulto e de 0,7 m/s em caso de existência de obstáculos tipo degraus e desníveis acima de 15% ; o tempo de aviso de 13 minutos e o de resposta de 15 minutos. Propõem, por fim, o uso de abrigos verticais para diminuir congestionamentos durante a evacuação, levando em consideração se os edifícios respondem aos critérios de segurança para tal.

3 METODOLOGIA

Os passos metodológicos para o encaminhamento e para a realização da proposta do presente trabalho são descritos abaixo e seguem o fluxo apresentado na Figura 11. Trata-se de um experimento simplificado, com diversas limitações, não sendo indicado o uso dos resultados de forma prática.

Figura 11 – Fluxograma representativo do método



Fonte: Autora (2020)

3.1 ÁREA DE ESTUDO

Para a presente análise, existia a necessidade de encontrar um objeto de estudo que fosse, de preferência, uma cidade situada a jusante de uma barragem e próxima o bastante para que a análise de vulnerabilidade pudesse ser justificada e para que o modelo pudesse ser testado.

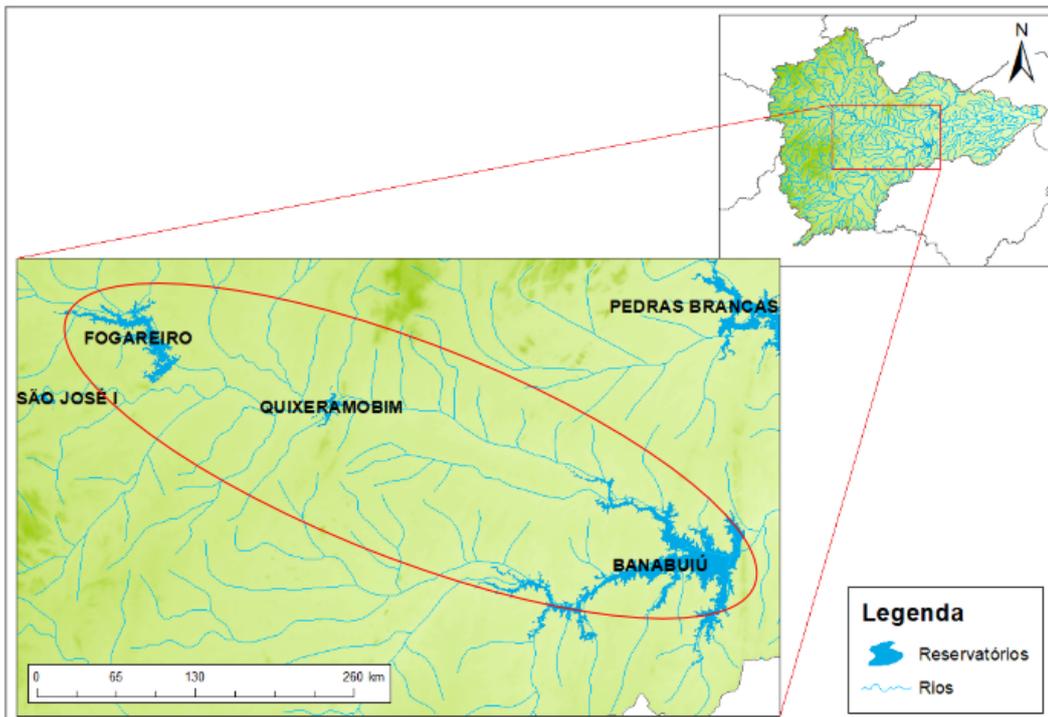
Sendo assim e considerando também que o trabalho, apesar de almejar a avaliação da vulnerabilidade regional, não tem como objetivo desenvolver a mancha de inundação, optou-se por utilizar uma modelagem já existente.

Para isso, selecionou-se a modelagem proposta por Oliveira (2018) para a barragem de Quixeramobim, visto que, a jusante da sua estrutura, existem muitas áreas habitadas que são, inclusive, classificadas como áreas urbanas pelo IBGE. O referido estudo propõe a modelagem de ruptura em cascata das barragens Fogareiro, Quixeramobim e Banabuiú que foram selecionadas

não só pela facilidade de obtenção de dados como também pela proximidade das estruturas apresentada na Figura 12 (OLIVEIRA, 2018).

O município escolhido se localiza no estado do Ceará na mesorregião dos sertões cearenses, possui 75.565 habitantes e praticamente todo o seu território está inserido na bacia hidrográfica do rio Banabuiú, sendo o rio Quixeramobim um dos seus afluentes e o principal curso d'água da cidade (Prefeitura de Quixeramobim, 2020).

Figura 12 – Detalhe da localização dos açudes Fogareiro, Quixeramobim e Banabuiú



Fonte: (OLIVEIRA, 2018)

3.2 VULNERABILIDADE REGIONAL

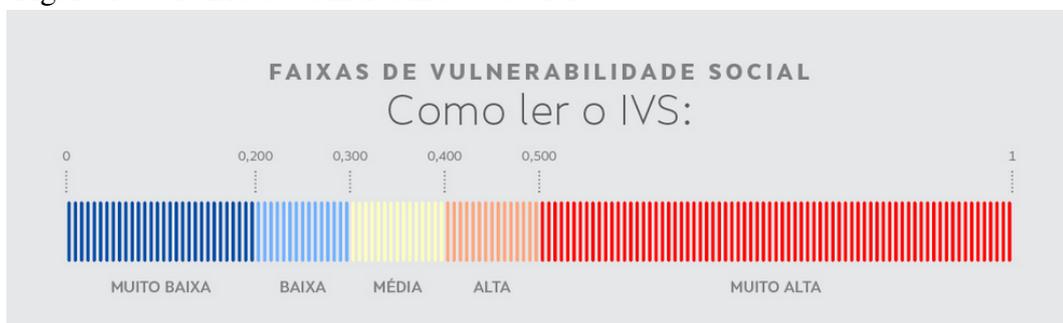
A análise da vulnerabilidade regional seguiu os passos descritos abaixo, iniciando pela delimitação da mancha de inundação proposta por Oliveira (2018) em caso de falha na barragem Quixeramobim, seguida pela determinação da Zona de Autossalvamento e dos parâmetros relevantes para o estudo mediante escolha dos indicadores que mais se adequariam para quantificar a vulnerabilidade da região. Por fim, foram elaborados os mapas para o referido município.

É importante destacar que para os indicadores, considerou-se uma escala de medida comum a todos em que há a consideração do pior caso como peso 1 e do melhores caso como

peso 0. No caso do Indicador de Densidade Demográfica (IDD), houve uma adequação aos pesos por meio do índice GINI que considera interpolações: diferença entre o valor do setor censitário de interesse e o valor do setor em melhor situação, dividida pela diferença entre o pior e o melhor valor entre todos os setores censitários (DRACHLER *et al.*, 2014).

Após o cálculo dos indicadores individuais, houve a divisão de acordo com os pesos em 5 classes para elaboração e avaliação dos mapas, variando de 0,2 como apresentado na Figura 13, sendo elas: 0,0 a 0,2 (Muito Baixa); 0,2 a 0,4 (Baixa); 0,4 a 0,6 (Média); 0,6 a 0,8 (Alta); 0,8 a 1,0 (Muito Alta) (INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA), s.n; PINHO *et al.*, 2019).

Figura 13 – Faixa de vulnerabilidade social



Fonte: (IPEA, s.n)

3.2.1 Modelagem da Ruptura

Para viabilizar a simulação da ruptura, Oliveira (2018) utilizou o software HEC-RAS (*River Analysis System*) tanto pela sua popularidade como por ser livre. A primeira fase foi a aquisição do hidrograma de ruptura feito pela Secretaria dos Recursos Hídricos (SRH)-CE por meio do software HEC-HMS.

Dando sequência à modelagem, a propagação da onda de cheia no vale a jusante foi feita mediante a consideração de dois cenários: primeiramente considerou-se uma vazão advinda de um período de retorno de 1000 anos e posteriormente considerando apenas o volume acumulado nos reservatórios. De acordo com a Tabela 1 pode-se notar que, independentemente dos cenários, a barragem Quixeramobim poderá sofrer galgamento e causar danos na região a jusante.

Para a modelagem, Oliveira (2018) considerou alguns dados de entrada, sendo eles: a topografia da região, representada pela declividade do canal, pelo alinhamento e pelas seções transversais ao longo do rio; vazões de pico; coeficiente de rugosidade (número de Manning) igual

a 0.035; dimensões da brecha de ruptura e tempo de desenvolvimento, conforme apresentado na Tabela 2. Por causa de limitações e por se tratar de um estudo preliminar, utilizou-se um Modelo Digital de Elevação (MDE) a partir de imagens *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) de precisão estimadas das altitudes na ordem de 2 a 5 metros.

Tabela 1 – Cenários da modelagem

	Cenário 1	Cenário 2
Período de retorno do evento de chuva (TR) (anos)	1,000	-
Rompimento - Fogareiro	Sim	Sim
Rompimento - Quixeramobim	Sim	Sim
Rompimento - Banabuiú	Não	Não

Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA, 2018)

Tabela 2 – Valores obtidos para as brechas

Barragem	Bméd (m)	t (h)	z
Fogareiro	182.29	2.66	1
Quixeramobim	90	0.5	0
Banabuiú	387.89	4.29	1

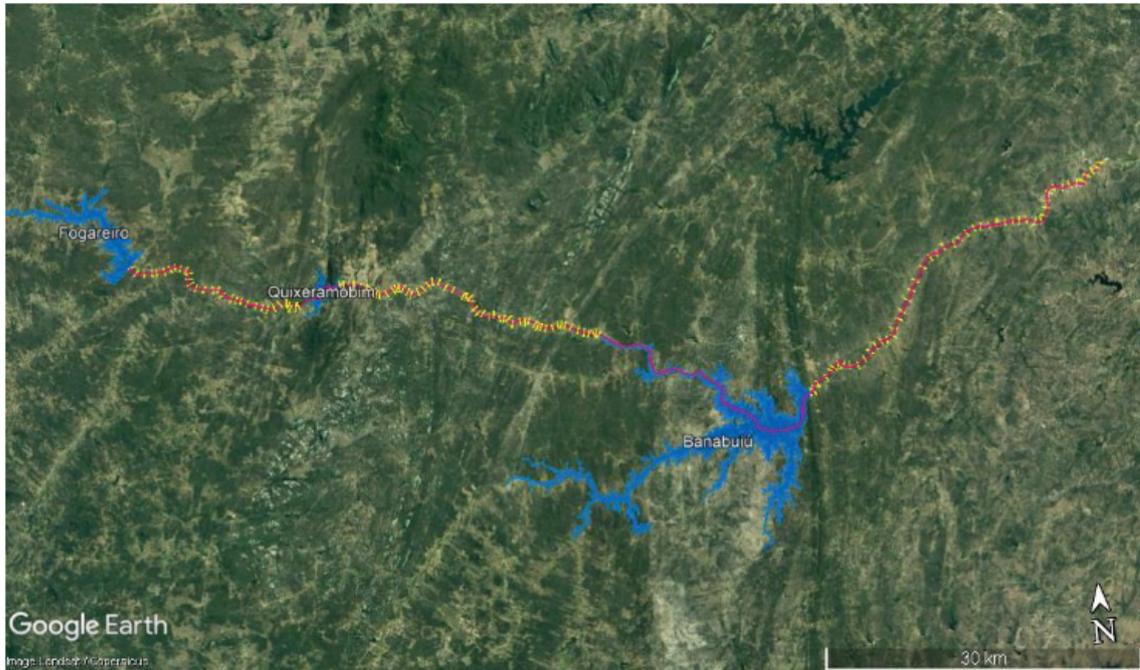
Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA, 2018)

Com isso, houve a preparação dos dados topográficos de entrada para o HEC-RAS mediante o auxílio de softwares como o Google Earth, por meio do qual foram traçados os limites dos rios a jusante de cada uma das estruturas, bem como as seções transversais de 800 m de largura, abrangendo a calha do rio. No total foram feitas 139 seções.

O arquivo gerado anteriormente foi exportado para o software Global Mapper e, a partir do MDE com imagens SRTM, foi possível gerar as curvas de nível principais a cada 5 metros e as secundárias a cada 1 metro (OLIVEIRA, 2018).

Posteriormente, houve a geração da superfície do terreno com a função Surface do AutoCad Civil 3D 2018, bem como a divisão e o alinhamento do rio para representar as regiões a jusante de cada barragem do estudo e para conseguir exportar para o HEC-RAS. As declividades dos trechos foram calculadas pelo comprimento encontrado no AutoCad Civil 3D e a diferença de cota pelo Google Earth.

Figura 14 – Rio principal, reservatórios e seções transversais



Fonte: (OLIVEIRA, 2018)

3.2.2 *Determinação dos parâmetros*

A escolha dos parâmetros foi feita não só pela consideração daqueles abordados em métodos já propostos, como também nas limitações apresentadas pelos autores. Assim, pôde-se chegar a uma quantidade de 34 parâmetros que variam desde dados regionais quantitativos até dados sociais qualitativos, sendo eles:

1. Dados quantitativos: abastecimento de água; esgotamento sanitário; coleta de lixo; energia elétrica; sistema de telecomunicações; renda; idade; escolaridade; gênero; densidade demográfica; empregos; condição de dependência (deficiência); lotação por casa; altura de onda esperada;
2. Dados qualitativos: existência e participação em programas de treinamento e de educação em desastres; conhecimento sobre risco; comportamento frente a ocorrência de desastre; vulnerabilidade institucional/ nível de organização; existência de pontos de encontro; existência de rotas de fuga; existência de sistemas de alarmes/ sirenes; existência de plano de contingência e de brigadas de emergência; mapas de risco; proximidade ao local do incidente; topografia; área de risco; uso e ocupação do solo.

Posteriormente, foi feito um levantamento para verificação da viabilidade o estudo, mantendo como um dos critérios de escolha a facilidade de obtenção dos mesmos distribuídos por setor censitário para que se consiga uma boa representatividade dentro da área de estudo.

Assim, identificou-se que a maioria dos dados de caráter social quantitativo puderam ser obtidos por meio do Censo de 2010 feito pelo IBGE. É importante destacar, porém que, apesar da ciência de que o acesso aos sistemas de telecomunicações e a condição de dependência/deficiência física do indivíduo influenciam a resposta das instituições e da população frente ao desastre, não foi possível obter os bancos de dados organizados por setores censitários.

Ademais, o "acesso a empregos" também não foi considerado, pois o parâmetro "renda" já supre a avaliação do impacto econômico na vulnerabilidade, visto que está bastante relacionada com o acesso aos serviços básicos.

Já para os dados qualitativos, com exceção daqueles relacionados à mancha de inundação, foi concluído que a maioria seria obtida por meio de pesquisas de campo com a população e com as instituições municipais. Assim, apesar de também serem relevantes, são inviáveis para o presente estudo.

No que tange ao uso e à ocupação do solo, optou-se por incrementar como um dado temático o uso do solo na região, visto que a vulnerabilidade e a evacuação podem ser influenciadas pelo elevado movimento e pelo número de pessoas a serem evacuadas em polos comerciais.

No caso dos dados referentes à topografia, à proximidade com o local do incidente, à área de risco e à altura de onda esperada, a análise será feita a partir da simulação de cheia proposta por Oliveira (2018).

Por fim, a determinação da Zona de Autossalvamento foi feita seguindo a determinação da Agência Nacional de Água (ANA) que aponta como um dos critérios a consideração do trecho de 10 km a partir do pé da barragem. É importante salientar que optou-se por esse método devido à limitação de dados e para simplificar o estudo, mas existe outra condição que depende do tempo de chegada da onda que pode representar melhor a situação.

3.2.3 Cálculo dos Indicadores

Os indicadores, assim como os parâmetros, foram escolhidos mediante pesquisas feitas e o critério de escolha também foi pela simplicidade de cálculo. Sendo assim, resolveu-se adotar os indicadores propostos por Pinho *et al.* (2019). A explicação dos indicadores, bem como seus cálculos são mostrados abaixo:

3.2.3.1 Indicador de Vulnerabilidade Social (IVS)

O Indicador de Vulnerabilidade Social (IVS) descreve as características sociais que influenciam no processo de evacuação, como o grau de exposição das pessoas e a capacidade de resposta delas frente situações de emergência (PINHO *et al.*, 2019).

Para cada um dos parâmetros sociais elencados, deve-se calcular o indicador individual por meio da razão entre a quantidade de pessoas na condição de maior vulnerabilidade e a quantidade de pessoas por setor censitário. O valor do indicador varia entre 0 e 1, sendo 1 o identificador da pior condição de vulnerabilidade. O indicador individual proposto por Pinho *et al.* (2019) pode ser calculado pela Equação 3.1:

$$iv = \frac{\text{Casos de maior vulnerabilidade}}{\text{Quantidade de Habitantes}} \quad (3.1)$$

Sendo assim, para cada parâmetro, foram somados os dados que se referiam às piores situações e dividido pelo número de habitantes por setor censitário. Para o parâmetro "abastecimento de água" considerou-se que as piores situações eram aquelas que não estavam relacionadas com o acesso à rede geral; para o "acesso a esgotamento sanitário", a ligação à rede pública é a melhor opção e todas as outras foram consideradas como maior vulnerabilidade; no caso do "acesso à energia elétrica", houve a consideração como piores casos aqueles relacionados à abastecimento por energias alternativas, os domicílios sem energia e aos domicílios que não possuem relógio próprio (PINHO *et al.*, 2019).

Ainda, de acordo com proposições de Pinho *et al.* (2019), no caso do "serviço de coleta de lixo", o acesso ao serviço público de coleta e caçamba foram considerados como as melhores situações; o parâmetro "renda" foi avaliado como pior caso aqueles em que a renda per capita variava de zero a 1 salário mínimo; no caso da "idade", considerou-se que crianças abaixo de 6 anos e idosos acima de 60 representam os mais vulneráveis em caso de evacuação; a "escolaridade" foi vista como ruim quando a população não é alfabetizada e, por fim, para o parâmetro "gênero", considerou-se todas as mulheres e os homens até os 12 anos.

Após o cálculo de todos os indicadores individuais, o indicador individual geral foi calculado pela Equação 3.2 abaixo que representa uma média aritmética, pois todos os indicadores influenciam da mesma forma na análise.

$$IV = \frac{iva + ivEs + ivL + ivEE + ivR + ivI + ivEd + ivG}{8} \quad (3.2)$$

onde: iva é o indicador de abastecimento de água; o ivEs é o indicador de acesso a esgotamento sanitário; o ivL é o indicador de acesso a serviço de coleta de lixo; o ivEE é o indicador de acesso à energia elétrica; o ivR corresponde ao de renda; o ivI ao de idade; o ivEd é o indicador de escolaridade e o ivG o de gênero.

Após isso, o IVS para cada setor censitário foi padronizado de 0 a 1 pela Equação 3.3 e pôde-se gerar os mapas temáticos no software QGis para análise da vulnerabilidade social.

$$IVS = \frac{IV_{do\text{setor}} - IV_{menor}}{IV_{maior} - IV_{menor}} \quad (3.3)$$

Por fim, é importante destacar que durante a coleta no banco de dados do IBGE, algumas variáveis não estavam relacionadas ao número total de moradores. Assim, optou-se por fazer pequenas correlações para que fosse possível obter os dados para o mesmo universo que, no caso, se baseou na quantidade de moradores de domicílios particulares e coletivos.

3.2.3.2 Indicador de Densidade Demográfica (IDD)

O Indicador de Densidade Demográfica (IDD) proposto é calculado pela razão entre a quantidade de pessoas do setor pela área do mesmo e visa avaliar a quantidade de pessoas que deverão ser evacuadas por região (PINHO *et al.*, 2019). Assim como o IVS, o IDD também será atribuído uma nota de 0 a 1, sendo 1 o pior caso.

$$IV = \frac{\text{Quantidade de moradores}}{\text{Area em km}^2} \quad (3.4)$$

O número de moradores do município de Quixeramobim foi obtido por meio da variável "Moradores em domicílios particulares e coletivos - V001"pertencente à planilha "Domicilios02_UF"do Censo de 2010. Já a área dos setores censitários foi obtida pelo software QGis e o cálculo do indicador foi feito pelo Excel.

Após isso, houve a ordenação crescente dos dados obtidos e a cada um foi feita a adequação a uma nota que variava de 0 a 1, representando, respectivamente, os casos de menor e maior densidade demográfica. Esse cálculo seguiu os critérios estabelecidos para o índice GINI e foi feito por meio de interpolação seguida da separação em 5 classes de vulnerabilidade.

Ao todo, após a compilação dos dados dos parâmetros com os dados das bases cartográficas do IBGE, houve a contabilização de 119 setores censitários no município de

Quixeramobim que tiveram seus cálculos viabilizados. O banco de dados foi, então, levado ao software QGis, possibilitando a criação dos mapas de densidade demográfica e de vulnerabilidade social.

3.2.3.3 *Indicador de Integração de Vias (IIV)*

O Indicador de Integração de Vias (IIV) busca avaliar, por meio da Teoria da Sintaxe Espacial (SE), o traço urbano como facilitador ou não dos movimentos para caracterizar as áreas que auxiliam ou dificultam a evacuação. Para isso, há a produção de linhas axiais para o cálculo do índice de integração (Rn) e para possibilitar a construção de uma matriz que gera valores que representam as relações entre as feições (PINHO *et al.*, 2019).

Assim, primeiramente foi obtido o mapa axial por meio do *OpenStreetMap* via QGis com sistema de coordenadas UTM Sirgas 2000 - ZONA 24S. Esse passo também pode ser feito de forma manual ou pelo software livre *DepthMap* com base no mapa dos logradouros disponibilizado pelo IBGE.

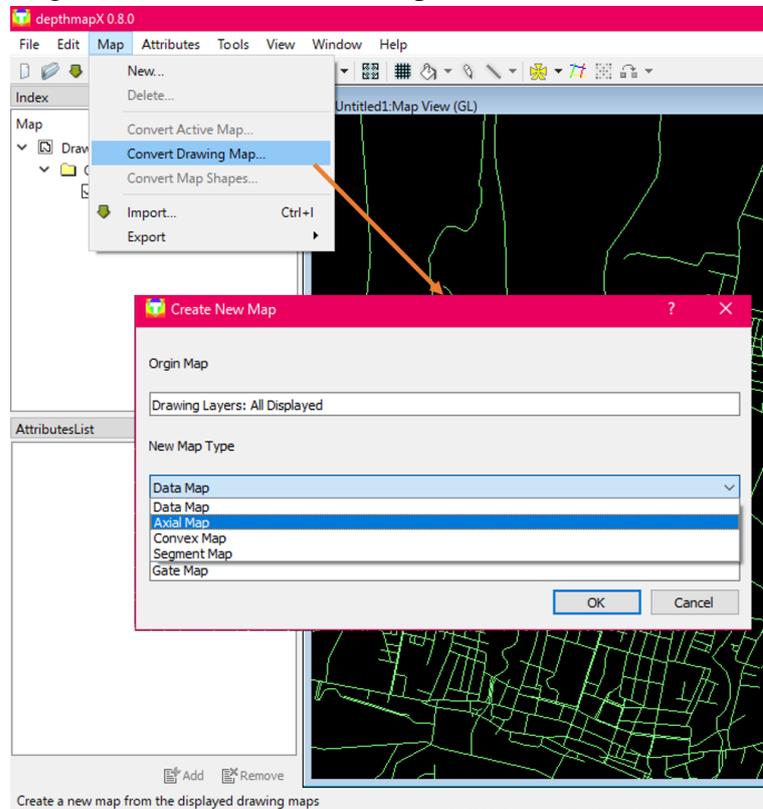
Após isso, o mapa foi exportado no formato dxf. e o arquivo foi levado ao *DepthMap* para que fosse possível fazer o cálculo do índice de integração de cada via. Para isso, foram seguidos os seguintes passos:

- Análise do mapa axial obtido no QGis para limpar possíveis erros, como linhas menores que 1 metro e linhas duplicadas, bem como análise de interseções (*link/unlink*). Essa etapa pode ser feita ainda no QGis, utilizando o complemento *Space Syntax Toolkit* ou de forma manual pelo AutoCAD;
- Importação do mapa e conversão do tipo de mapa para mapa axial ("*Axial Map*") por meio do caminho: *Map - Convert Drawing Map - New Map Type - Axial Map* (Figura 15);
- Cálculo dos parâmetros da Sintaxe Espacial considerando um raio igual a 3 pelo fato de que a evacuação será feita a pé (Figura 16);
- O software calcula vários parâmetros, cabendo ao analista fazer a escolha daquele que mais se adéqua ao estudo. Nesse caso, será usada a Integração [HH] R3 que fornece o mapa em escala de cores de acordo com o nível de integração das vias;
- O último passo no software *DepthMap* foi a exportação do mapa e dos dados obtidos no formato .mif para o QGis.

Vale ressaltar que o cálculo do índice de integração também pode ser feito no QGis pelo complemento *Space Syntax Toolkit* dependendo da versão do *software* que está sendo utilizado.

A exportação do arquivo no formato .mif permitiu gerar uma *Shape File* no QGis e uma interseção com os setores. Os passos seguidos são descritos abaixo:

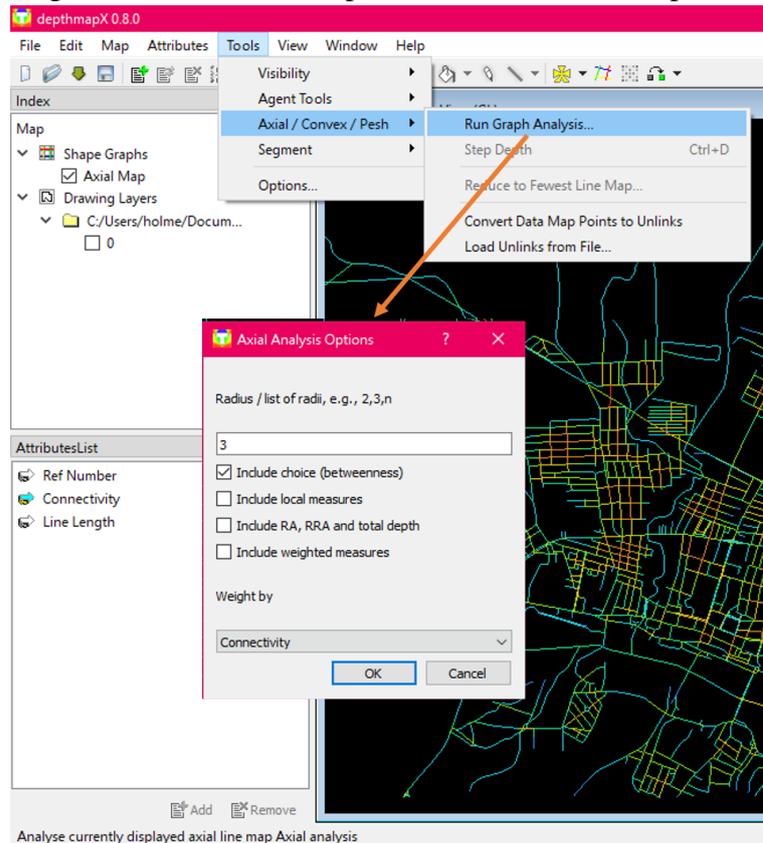
Figura 15 – Conversão em mapa axial



Fonte: Autora (2020)

- Importação do arquivo no formato .mif e salvamento como .shp. A verificação dos parâmetros calculados pode ser feita por meio da opção "*Attributes Explorer*" da extensão *Space Syntax Toolkit*;
- No menu "Processar", foi escolhida a opção "Gráfico Modelos" que consiste em um algoritmo para a manipulação de processos dentro do QGis;
- Como entradas do modelo foram selecionadas duas do tipo "*Vector Layer*" sendo a primeira uma camada do tipo "linha" por se referir ao mapa axial e a segunda uma camada do tipo "polígono" que se refere aos setores (Figura 17);
- Em seguida, devem ser adicionados os comandos: primeiramente, deve-se fazer um buffer de 7 metros na camada de entrada do mapa axial. Para isso, na opção "Algoritmo", pesquisou-se pela função "Buffer de distância fixa" (Figura 18).
- Por fim, devemos colocar uma função para que seja feita uma interseção entre a camada poligonal do Buffer e a camada poligonal dos setores, usando a função de interseção entre polígonos (Figura 19).

Figura 16 – Cálculo dos parâmetros da Sintaxe Espacial



Fonte: Autora (2020)

Com isso, as tabelas de atributos foram mescladas, tornando possível o cálculo dos indicadores de integração de vias para cada setor por meio do *software* Excel. Esse método descrito também pode ser feito por meio da plataforma *ModelBuilder* do ArcGis.

Para o cálculo do indicador, foi feita a classificação das vias de 1 a 5, representando, respectivamente, aquelas de maior integração e as de menor integração, seguido pela interpolação para padronização dos valores entre 0 e 1, como feito no IVS. A partir disso, os autores propuseram que o valor para cada setor seria dado pela média ponderada das classes e extensões das vias nas quais o determinado setor possui acesso direto, ou seja, aquelas vias que estão a até 7 metros de todas as direções de um setor. Para se ter um valor único para a integração, foi feita a média ponderada destes índices por suas classes e a soma dos comprimentos das linhas axiais, como mostrado abaixo:

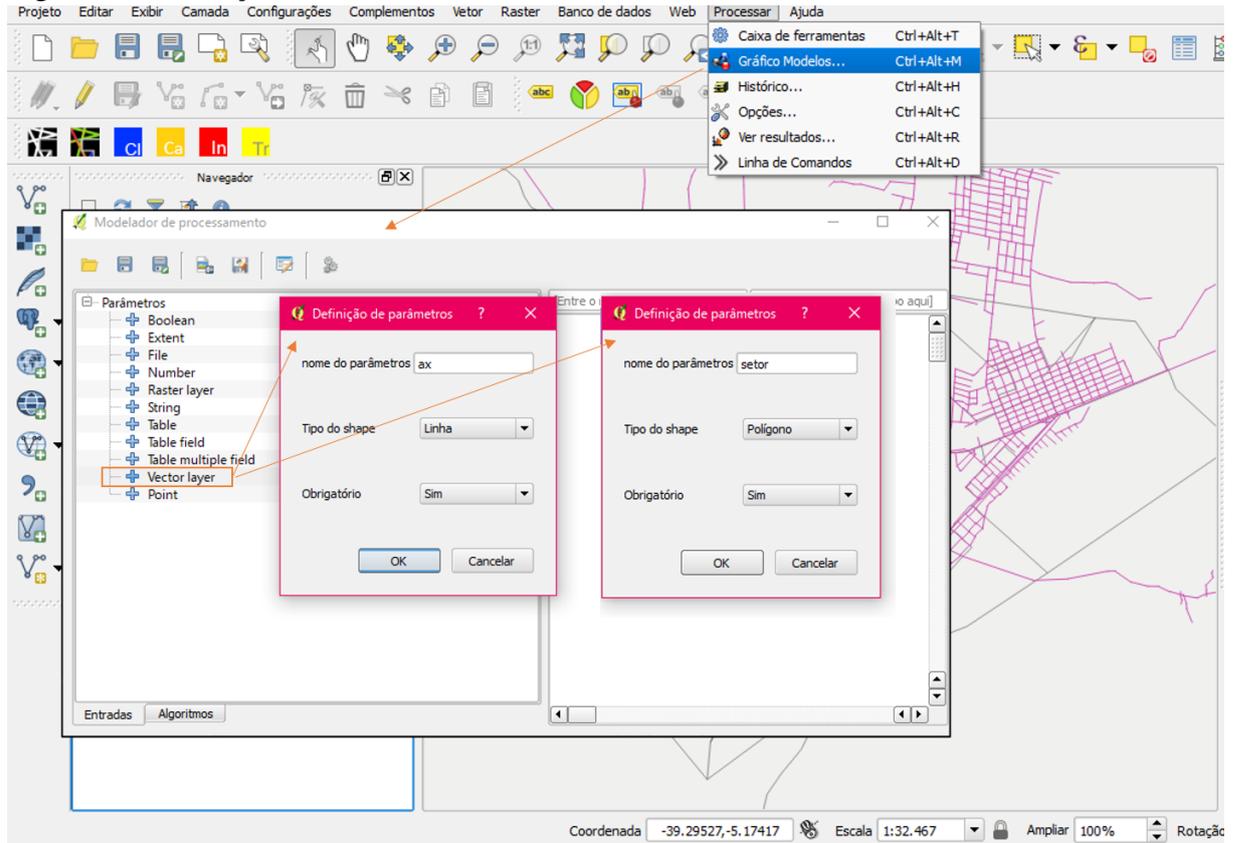
$$IVV = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i \times Ext_i)}{\sum_{i=1}^n Ext_i} \quad (3.5)$$

Para:

P_i = Classes das vias (1 a 5)

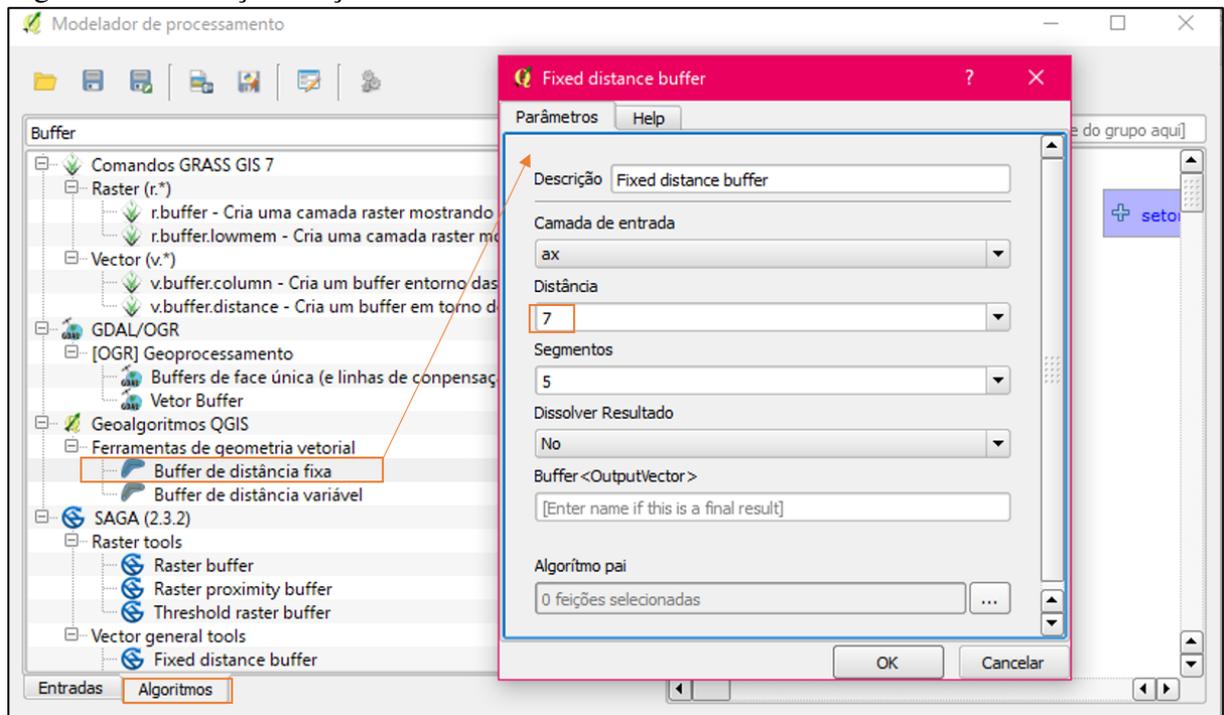
Ext_i = Extensão da via

Figura 17 – Inserção da camada de entrada do modelo



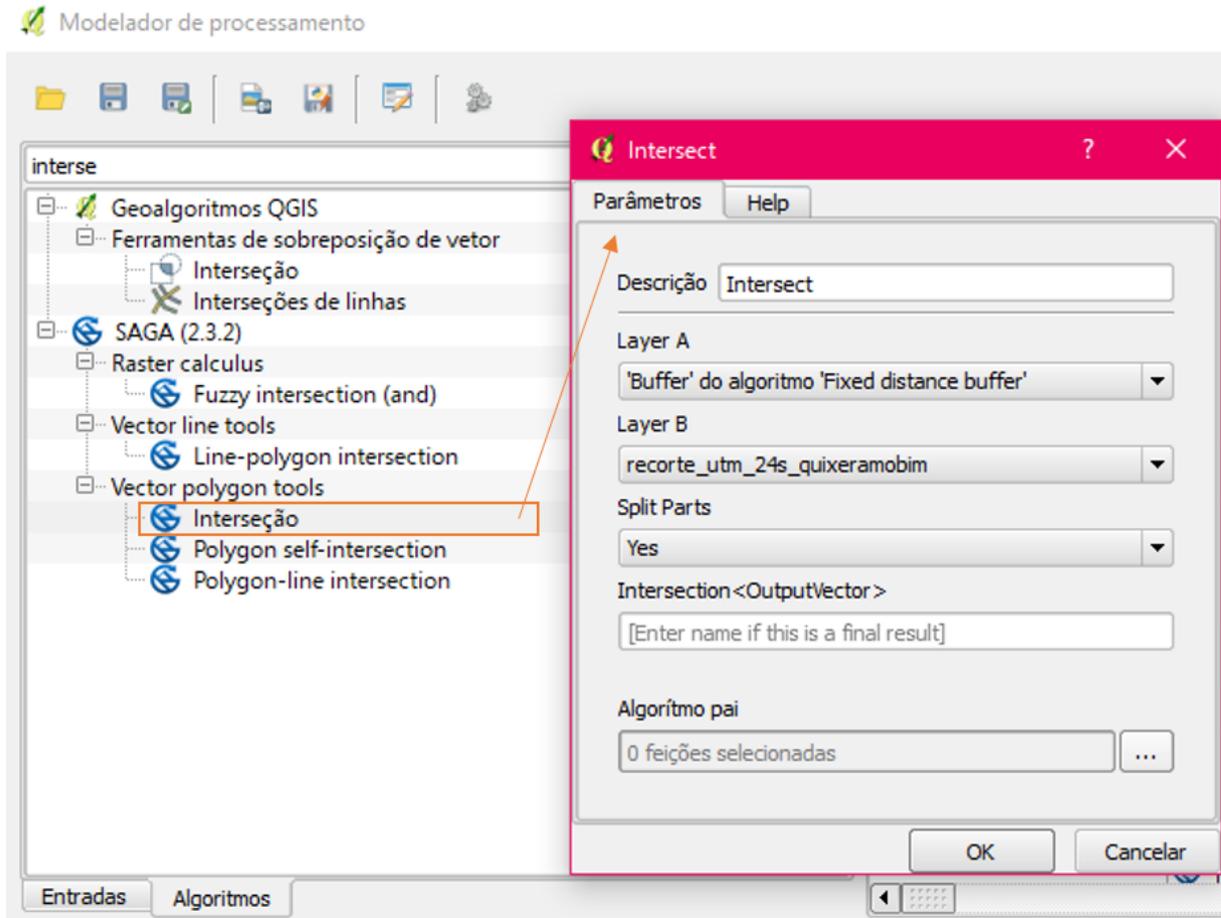
Fonte: Autora (2020)

Figura 18 – Inserção função "Buffer"



Fonte: Autora (2020)

Figura 19 – Inserção da função "Interseção"



Fonte: Autora (2020)

3.2.3.4 Indicador de Vulnerabilidade de Evacuação (IVE)

Por fim, o Indicador de Vulnerabilidade de Evacuação (IVE) é composto pelos três anteriores e representa a dificuldade que as pessoas podem enfrentar em caso de evacuação. O cálculo do IVE pode ser feito pela média aritmética dos três indicadores e também é avaliado de 1 a 0, correspondendo, respectivamente, às áreas de maior e menor vulnerabilidade de evacuação (PINHO *et al.*, 2019).

Pinho *et al.* (2019) consideram que o IVS, o IDD e o IIV são igualmente importantes para a análise e por isso optou-se por calcular o IVE como uma média aritmética.

$$IVE = \frac{IVS + IDD + IIV}{3} \quad (3.6)$$

Para:

IVS = Índice de Vulnerabilidade Social

IDD = Índice de Densidade Demográfica

IIV = Índice de Integração de Vias

3.3 PONTOS DE ENCONTRO

A escolha dos Pontos de Encontro/ Abrigos foi feita de acordo com critérios propostos em outros estudos utilizando como ferramenta principal o Google Earth e a definição dos abrigos se deu por meio de 3 passos listados abaixo:

1. Identificação, pelo Google Earth, dos possíveis locais de abrigo;
2. Sobreposição da mancha de inundação com o mapa de setores censitários para identificação da quantidade de pessoas a ser evacuadas;
3. Verificação da oferta de alojamento para o número de evacuados.

Primeiramente, procurou-se identificar os pontos fora da mancha que pudessem receber as pessoas, como escolas, igrejas, ginásios, hospitais, pousada e áreas descampadas, marcando no mapa junto à área da mancha de inundação. Vale ressaltar que, como apresentado por OLIVEIRA (2018), existem açudes pequenos dentro da cidade que podem romper por efeito da ruptura da barragem de Quixeramobim, e, assim, durante a análise, procurou-se escolher pontos não tão próximos a esses açudes.

Em seguida, com a sobreposição dos mapas dos setores censitários e da mancha de inundação, identificou-se todos os setores que deveriam ser evacuados. Durante a verificação, foram selecionados 8 setores que terão seus territórios completamente evacuados, visto que se encontram inteiramente na mancha de inundação, e 19 que não serão vitimados completamente.

Com isso, foi possível calcular a quantidade de pessoas a serem evacuadas na região. Para os 8 setores censitários que estão completamente imersos na mancha, a população considerada foi igual ao total para cada setor, e para os 19 setores restante, houve um cálculo do número de evacuados a partir da Densidade Demográfica calculada previamente e da área acometida com o desastre.

Além disso, foram divididos de acordo com a localização em relação ao rio para que pudesse ser feito o cálculo da quantidade de pessoas a serem abrigadas por cada um dos abrigos horizontais existentes e a capacidade foi calculada considerando que para cada pessoa deveria ser destinada uma área de $1 m^2$ para o socorro imediato.

3.4 ROTAS DE FUGA

As rotas de fuga puderam ser feitas a partir da localização dos abrigos e dos setores que deveriam ser evacuados. Por meio da ferramenta "caminho mais curto" do QGIS, que traça o roteiro mais curto ou o mais rápido entre dois pontos, fez-se a disposição das rotas.

Como *input*, a ferramenta exige os pontos de origem e de destino, a velocidade em km/h e a direção do movimento (vante, ré ou ambos). No caso do estudo, foi considerada a hipótese de o deslocamento ser feito a pé, visto que o uso de veículos motorizados necessitaria de um melhor planejamento de tráfego, bem como de oferta igualitária para toda a população.

Para isso, foi usada a velocidade proposta pelo procedimento do U.S.HCM2000 que é de 1,2 m/s e direção de movimento nos dois sentidos. Além disso, optou-se pela análise da rota pelo menor caminho por não sofrer influência de horário e nem de fluxo.

Inicialmente, foram definidos os pontos de partida de cada área a ser evacuada. Esse processo se deu pela sequência de 3 passos:

- Foi criada uma *shapefile* de pontos localizados nas regiões de maior densidade de construção, de acordo com o observado pelo Google Earth;
- Gerou-se, pelo próprio QGIS, a malha de polígonos de *Voronoi* para a camada de pontos criada, objetivando a visualização das regiões que seriam impactadas por cada um desses pontos;
- Fez-se, assim, o recorte dos Polígonos de *Voronoi* com a mancha de inundação, pois alguns polígonos estavam cobrindo áreas que não precisariam ser evacuadas, e foram calculados os centroides geométricos da camada resultante.

Em seguida, de cada centroide foram feitas rotas para os destinos (abrigos) mais próximos, sendo escolhida aquela com o menor custo de viagem dado pela ferramenta usada. Além disso, para os setores cujos centroides não se encontravam sobre a rede viária, tiveram que ser usados os pontos originais (pretos) para que a ferramenta fizesse o traçado.

Após a escolha da roteirização, foi feito o cálculo da distância que os pedestres deverão caminhar em cada rota para que fosse possível calcular o tempo esperado do percurso. Esse cálculo foi feito pelo método simplificado do movimento uniforme, sem considerar acelerações.

Os períodos de percurso de cada rota foram comparados ao tempo de evacuação esperado. O Tempo de Evacuação, como apresentado na Equação 2.1, é dado pela diferença entre o tempo de chegada da onda e os tempos de alerta e de resposta da população. Além disso, os polígonos que deram origem aos centroides foram utilizados como a área de influência para

o cálculo da quantidade de pessoas possivelmente assistidas por cada rota mediante o uso das densidades demográficas calculadas anteriormente.

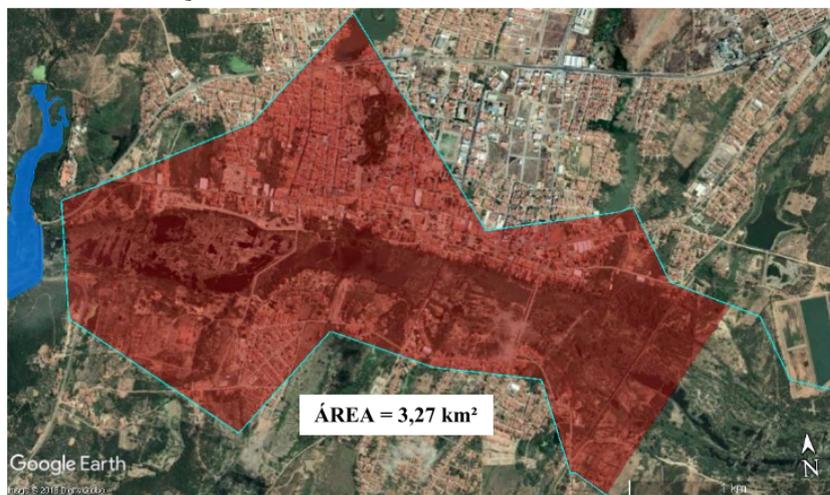
Apesar de no presente estudo não ter sido possível o cálculo da chegada da onda por seção, como a análise se restringiu à Zona de Autossalvamento, resolveu-se adotar o Tempo de Chegada da Onda como 30 minutos baseado na definição proposta pela ANA. Os tempos de alerta e de reação foram retirados do estudo de Trindade (2014) e de Trindade *et al.* (2018) e serão comparadas as situações em que o tempo de reação será de 15 minutos para os períodos de alerta de 8 e de 13 minutos.

4 RESULTADOS

4.1 MODELAGEM DA RUPTURA

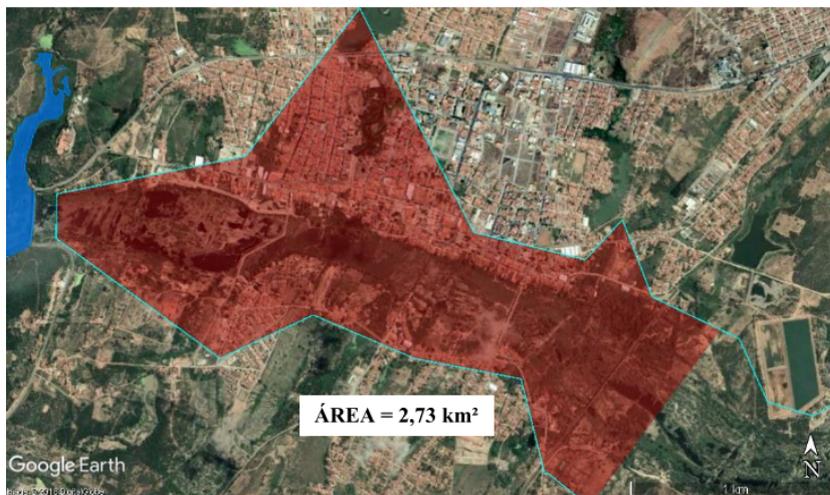
Para Quixeramobim, os mapas de inundação gerados a partir dos dois cenários, como ilustrado nas Figuras 20 e 21, apresentaram uma diferença de 16,5% na área atingida e ao comparar área do cenário 2 ao modelo simplificado (MS-20S), que também não considerava a ocorrência de chuva, identificou-se uma maior abrangência na área inundada (OLIVEIRA, 2018).

Figura 20 – Área inundada pela mancha de ruptura da barragem Quixeramobim - cenário 1



Fonte: (OLIVEIRA, 2018)

Figura 21 – Área inundada pela mancha de ruptura da barragem Quixeramobim - cenário 2

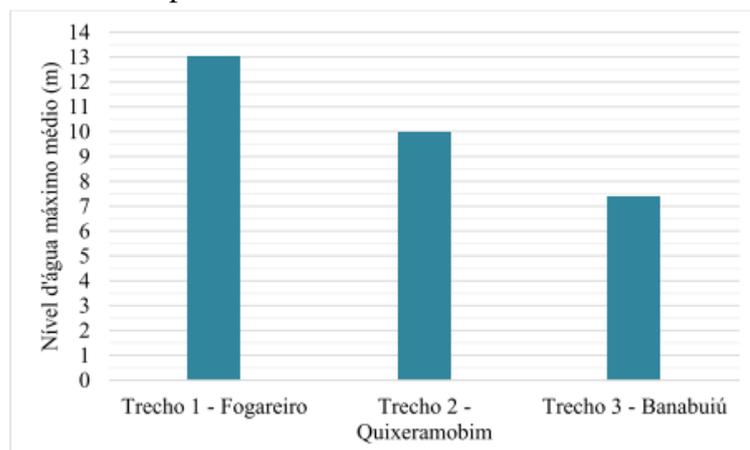


Fonte: (OLIVEIRA, 2018)

A seção proposta de 800 m para a calha do rio não foi suficiente em diversos pontos, tendo acontecido transbordamento em ralação ao limite da calha. Além disso, no trecho a jusante da barragem de Quixeramobim, não houve aumento da lâmina máxima média, pois a barragem possui taxa de acumulação baixa se comparada com a barragem a montante.

Apesar disso, a análise feita por Oliveira (2018) mostra que na seção localizada mais ao centro da cidade, a lâmina máxima supera o 6 m, podendo atingir fortemente as habitações, principalmente devido ao fato de se tratar de um município não muito verticalizado em que a maioria das edificações já seria submersa com uma lâmina de 3 metros. Ademais, o rio é intermitente e possui profundidade da ordem de centímetros, sendo mais de 6 m a lâmina, para o Cenário 1, no seu ponto mais profundo.

Figura 22 – Nível d'água máximo médio por trecho obtido para o Cenário 1



Fonte: (OLIVEIRA, 2018)

Apesar disso, a análise feita por Oliveira (2018) mostra que na seção localizada mais ao centro da cidade, a lâmina máxima supera o 6 m, podendo atingir fortemente as habitações, principalmente devido ao fato de se tratar de um município não muito verticalizado em que a maioria das edificações já seria submersa com uma lâmina de 3 metros. Ademais, o rio é intermitente e possui profundidade da ordem de centímetros, sendo mais de 6 m a lâmina, para o Cenário 1, no seu ponto mais profundo.

4.2 VULNERABILIDADE REGIONAL

Como o trabalho objetiva a avaliação da vulnerabilidade na região acometida com uma possível inundação, foram feitos mapas para possibilitar a análise de como a provável ruptura da barragem afetaria o vale. Sendo assim, houve a definição da Zona de Autossalvamento

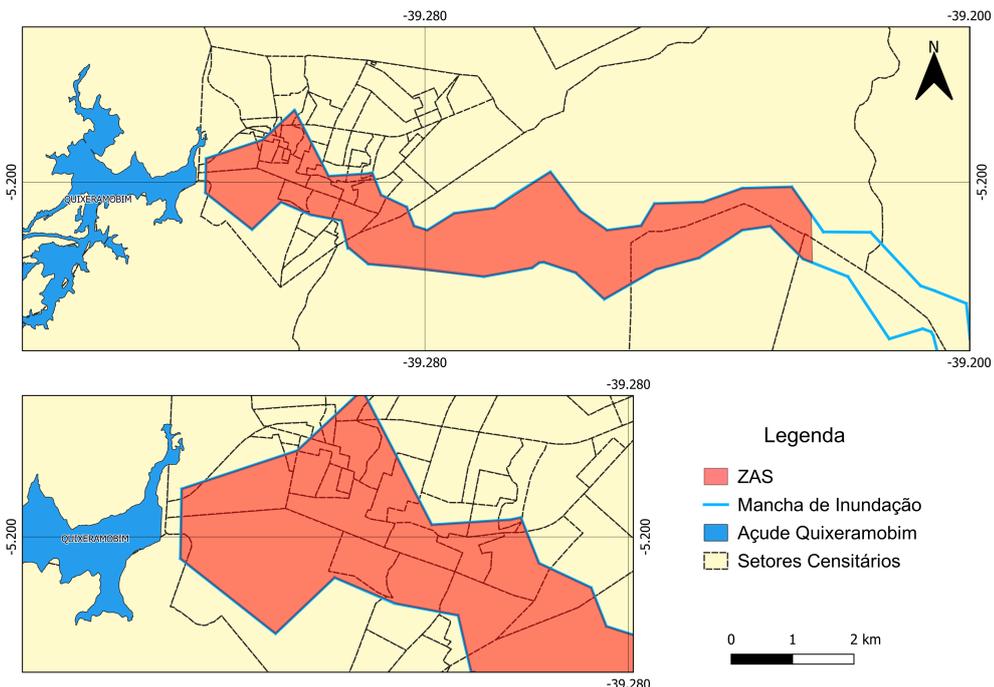
para a mancha do Cenário 1 que correspondeu à de maior área, bem como o cruzamento dos dados obtidos com a mancha e dos parâmetros sociais com a disposição dos setores.

4.2.1 Zona de Autossalvamento (ZAS)

A zona de autossalvamento pode ser vista no mapa temático apresentado na Figura 23, junto dos setores que serão acometidos com a onda. É importante lembrar que a delimitação seguiu um método simplificado que pode gerar incoerências em relação à situação real. Assim, em caso de posse de dados da simulação da mancha, é indicado que seja feito o cálculo do tempo de chegada da onda.

Ao todo, foram identificados 59 setores que serão afetados pelo desastre de forma direta e indireta, correspondendo a aproximadamente 59,71% da população total da cidade de Quixeramobim considerando os dados do Censo de 2010.

Figura 23 – Mapa temático da ZAS para a região a jusante da barragem Quixeramobim.



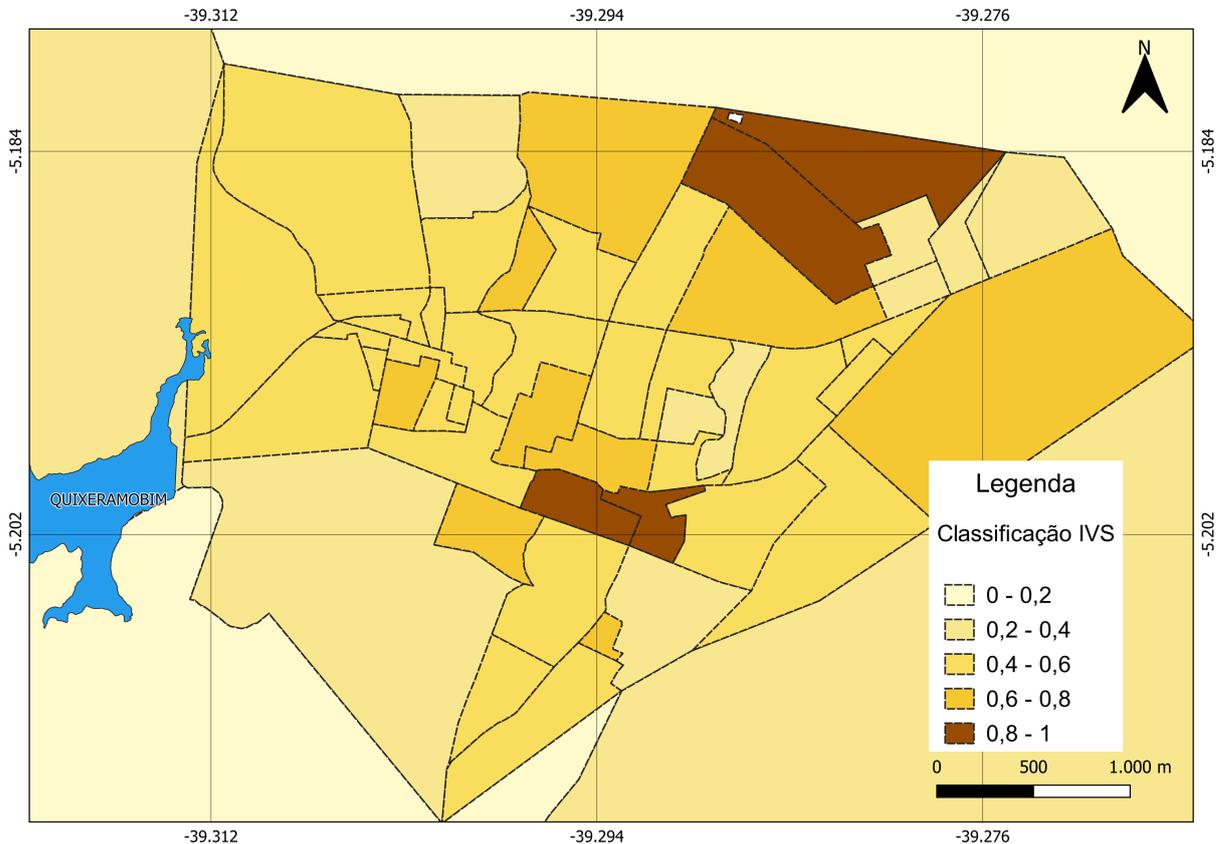
Fonte: Autora (2020)

4.2.2 Vulnerabilidade Social

Para o Indicador de Vulnerabilidade Social, foi gerado o mapa do vale a jusante da barragem, levando em consideração a separação dos dados de acordo com as 5 classes: muito

baixa, baixa, média, alta e muito alta. Na Figura 24, os tons de marrom mais escuro, caracterizam os setores com maior vulnerabilidade social e, em contrapartida, os de menor vulnerabilidade são caracterizados pelo tom mais claro.

Figura 24 – Mapa temático do Índice de Vulnerabilidade Social para a região a jusante da barragem



Fonte: Autora (2020)

Tabela 3 – Vulnerabilidade Social

Classe	Nº de Setores	Nº de Pessoas	% de População afetada
Muito Baixo	2	1622	4%
Baixo	13	11939	28%
Médio	29	21958	51%
Alto	11	5985	14%
Muito Alto	4	1422	3%
TOTAL	59	42926	100%

Fonte: Autora, 2020.

De acordo com o mapa é possível perceber que a maioria dos setores apresentou vulnerabilidade média e apenas 4 foram classificados com vulnerabilidade muito alta. Ao observar os setores que serão completamente acometidos pela inundação, 5 apresentaram taxa de vulnerabilidade alta e 2, taxa muito alta, mostrando que nessas regiões é necessário mais cautela

na evacuação, levando em conta a existência de grupos sociais mais suscetíveis, como crianças, idosos e mulheres, bem como regiões mais deficientes quanto ao acesso à serviço básico que pode gerar instabilidade física e insegurança no momento da emergência.

Além disso, lembrando que durante uma emergência é provável que ocorra o colapso de muitos sistemas de serviço básico, essas características podem impedir que essas regiões sejam escolhidas, porventura, como possíveis áreas para o aproveitamento de construções como abrigos verticais, sendo necessário o escoamento dos moradores da região para setores mais afastados. Isso pode gerar dispêndio maior durante a evacuação.

Por fim, deve-se atentar para a localização dos futuros abrigos, visto que alguns setores periféricos podem apresentar deficiência quanto ao acesso aos serviços básicos de infraestrutura, o que dificultaria a preservação das vítimas nos respectivos abrigos durante a fase de reabilitação.

4.2.3 *Densidade Demográfica*

A partir do mapa gerado e apresentado na Figura 25, pôde-se perceber que os setores periféricos em relação ao açude possuem Densidade Demográfica muito baixa. Além disso, na região a jusante, apenas um setor foi classificado como de densidade muito alta e o restante ficou enquadrado entre as classes muito baixa a alta, apesar de existirem, de acordo com imagens do Google Earth, muitas construções nessas regiões. A Tabela 4 resume os quantitativos por classe.

Tabela 4 – Densidade Demográfica

Classe	Nº de Setores	Nº de Pessoas	% de População afetada
Muito Baixo	39	27325	64%
Baixo	14	10751	25%
Médio	2	1193	2.8%
Alto	3	1408	3.3%
Muito Alto	1	2249	5%
TOTAL	59	42926	100%

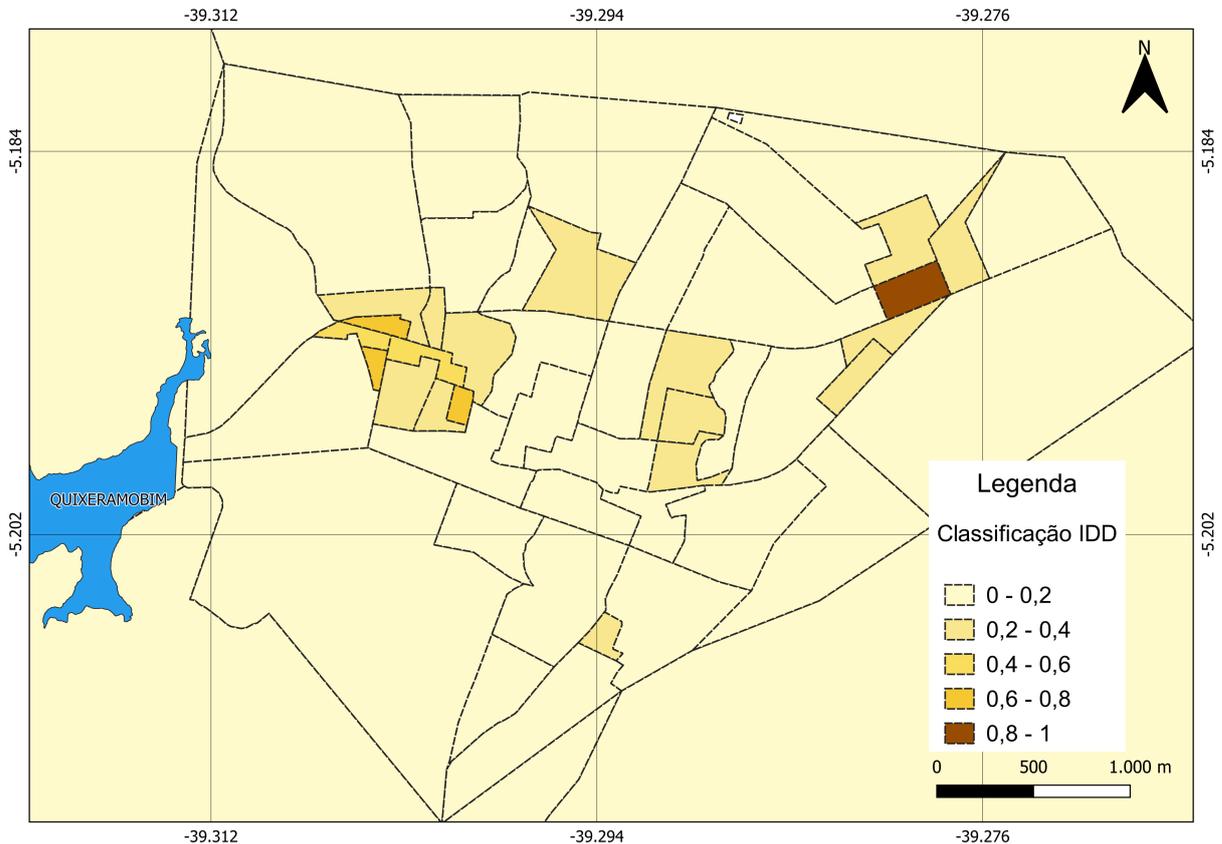
Fonte: Autora, 2020.

É possível notar também que os setores a jusante mais próximos ao eixo do barramento possuem densidades muito baixas, podendo ser justificado pela presença do rio que ocupa boa parte da área desses setores, bem como, a direita do rio, pela dificuldade de acesso ao centro da cidade que é permitida pela existência de três pontes.

Já na região que será acometida com a inundação, existem setores de maiores densidades demográficas que, provavelmente, necessitarão de mais rotas para escoar a população

em tempo hábil. Por fim, nessas áreas periféricas em que o terreno tem menor densidade demográfica, foram encontradas muitas áreas descampadas que podem ser consideradas para o acolhimento das vítimas e para a construção de abrigos temporários.

Figura 25 – Mapa temático do Índice de Densidade Demográfica para a região a jusante da barragem



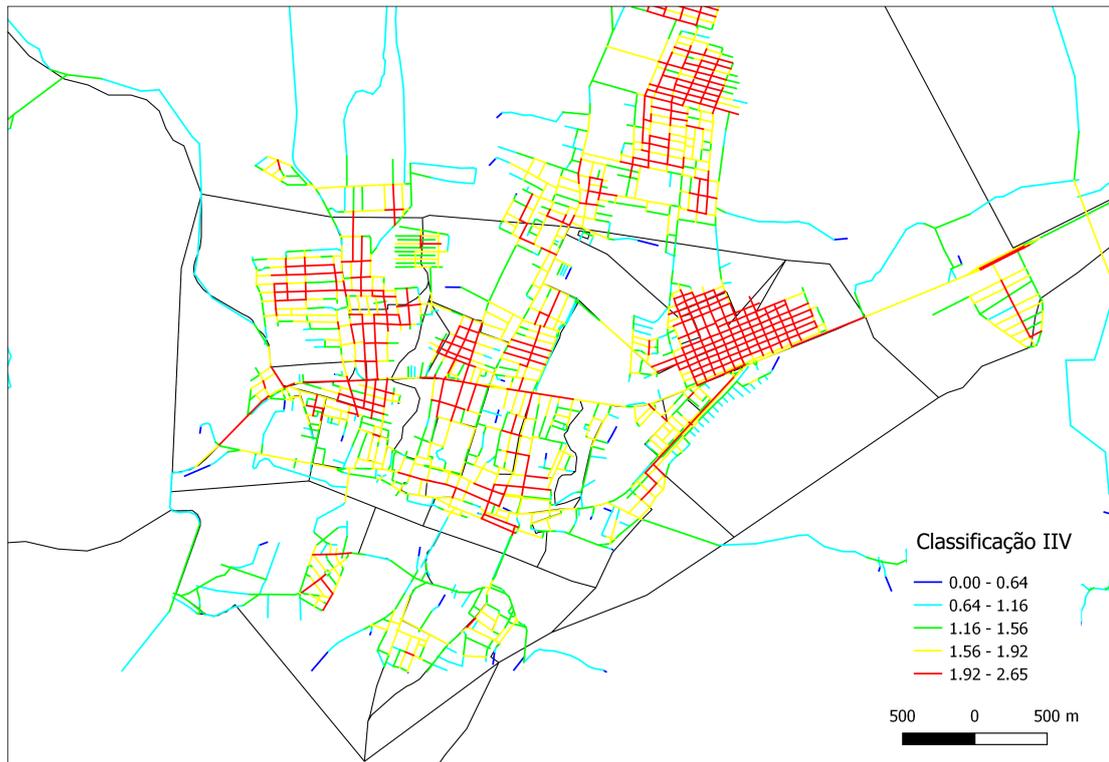
Fonte: Autora (2020)

4.2.4 Integração das Vias

A integração das vias pôde ser representada mediante a escolha de uma escala de 5 classes por quebras naturais e representadas por cores, partindo do azul escuro ao vermelho. Sendo assim, as vias mais distantes e inacessíveis estão representadas por cores mais próximas de azul e as mais conectadas, por cores mais próximas ao vermelho.

É possível perceber que o padrão de integração das vias se opõe aos comportamentos já observados nos índices anteriores e aquelas que ficam nos setores mais periféricos apresentaram menor integração e, portanto, Índices de Integração Individuais mais altos que as localizadas nos setores mais centrais, como mostrado na Figura 26. Esse padrão é comum para as cidades, visto que o centro, geralmente, concentra os maiores motivos de atração de viagens.

Figura 26 – Mapa axial em escala de cor para a Integração Individual das Vias (iiv)



Fonte: Autora (2020)

Aquelas regiões em que as vias não são bem integradas e, assim, que possuem maiores Índices de Integração de Vias, terão mais dificuldade quanto à evacuação da população e, assim, serão mais vulneráveis. As mais integradas e que proporcionam, na região, mais opções de roteiros, são menos vulneráveis. A Tabela 5 apresenta o resumo da quantidade de setores e de pessoas para cada classe considerada, sendo importante destacar que o total considerado, diferentemente dos índices anteriores, foi de 56 setores, visto que três dos 59 não apresentaram vias e possuem densidade populacional muito pequena.

Tabela 5 – Integração de Vias

Classe	Nº de Setores	Nº de Pessoas	% de População afetada
Muito Baixo	6	6252	15,1%
Baixo	30	20319	49,3%
Médio	14	12042	29,2%
Alto	2	798	1,9%
Muito Alto	4	1791	4,3%
TOTAL	56	41202	100%

Fonte: Autora, 2020.

Além disso, a região mais central localizada a esquerda do rio Quixeramobim apresentou a maioria dos setores enquadrados nas classes de IIV de muito baixo a médio, mostrando que nessa região, provavelmente, a evacuação será mais facilmente conduzida. A

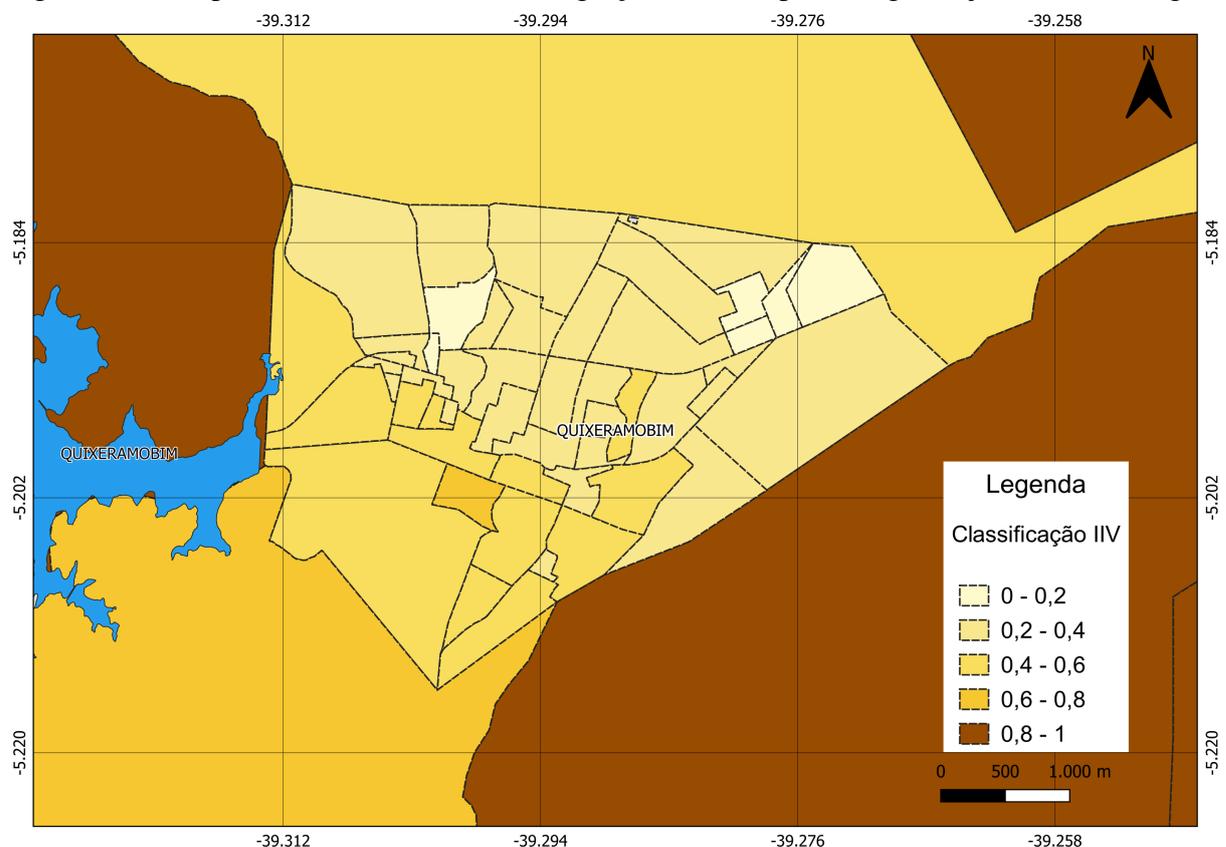
região central a jusante da barragem foi classificada com setores de médio a alto IIV, mas a maior parte dessa região é banhada pelo rio e a quantidade de pessoas a ser evacuada é pequena.

Já a região localizada a direita da margem apresentou IIV mais alto, mas a quantidade de pessoas atingidas é menor e a maioria das moradias se encontram já bem próximo do limite da mancha de inundação. Assim, provavelmente as vias serão suficientes para evacuar, em tempo hábil, a região.

O mapa de Integração de Vias por setor, apresentado na Figura 27, segue o mesmo critério de divisão de classes e de cores dos índices anteriores, ou seja, os setores em marrom mais escuro representam os de vulnerabilidade "Muito Alta" e os mais claros, os de vulnerabilidade "Muito Baixa".

Por fim, existe um setor censitário a jusante e mais afastado do centro que possui IIV muito próximo a 1 (cor marrom escuro), caracterizando uma situação de elevada vulnerabilidade, mas a região possui uma densidade demográfica bem reduzida, não tendo sido identificadas quaisquer construções ao longo da mancha de inundação.

Figura 27 – Mapa temático do Índice de Integração das Vias para a região a jusante da barragem

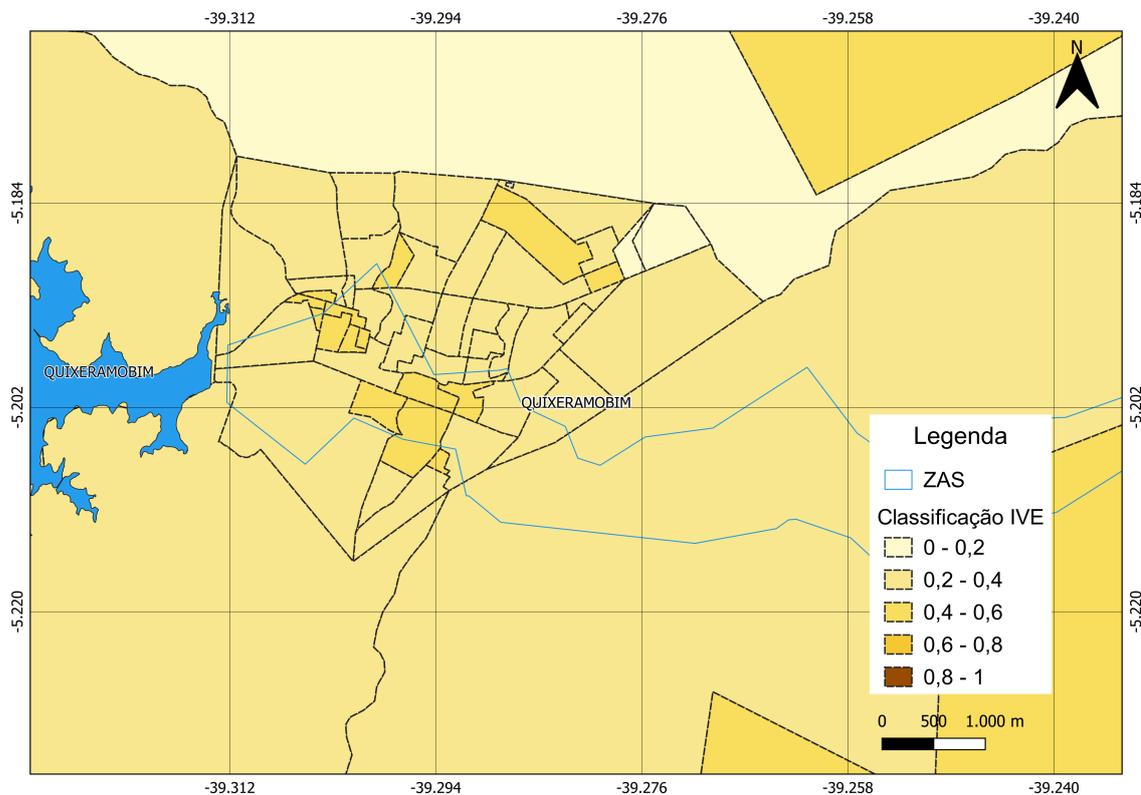


Fonte: Autora (2020)

4.2.5 Vulnerabilidade de Evacuação

Após o estudo de cada indicador de vulnerabilidade acima, pôde-se generalizar a classificação dos setores quanto a sua vulnerabilidade em um momento de evacuação, mostrando aqueles em que deverá haver mais atenção durante o planejamento das ações logísticas. O mapa temático pode ser visto na Figura 28.

Figura 28 – Mapa temático do Índice de Vulnerabilidade de Evacuação para a região a jusante da barragem



Fonte: Autora (2020)

Tabela 6 – Vulnerabilidade de Evacuação

Classe	Nº de Setores	Nº de Pessoas	% de População afetada
Muito Baixo	5	1423	4%
Baixo	37	24385	72%
Médio	17	7992	24%
Alto	0	0	0%
Muito Alto	0	0	0%
TOTAL	59	33800	100%

Fonte: Autora, 2020.

Apesar de existirem muitos setores na região com vulnerabilidade social de média a alta, o Índice de Vulnerabilidade de Evacuação mostrou que apenas 17 ficaram enquadrados com

vulnerabilidade média e os 42 restantes foram enquadrados nas duas classes mais baixas. Assim, a região em estudo tem potencial para responder bem às medidas emergenciais.

4.3 ABRIGOS

Primeiramente, a partir do cruzamento da mancha de inundação com o mapa do Google Earth, foi possível identificar os prédios públicos que não poderão ser usados como abrigos, visto que serão inundados, como a Prefeitura, a Secretaria da Saúde, o Tribunal da Justiça e a Casa Antônio Conselheiro. Além disso, foi identificado outros pontos que poderiam ser usados como abrigos, como o prédio do SEBRAE e o Clube da CAGECE.

Foram identificados dois hospitais, um localizado na ombreira esquerda da barragem que possui terreno livre para receber evacuados, bem como suporte para socorrer vítimas, e o Hospital Regional do Sertão Central localizado há 6,39 km da barragem de Quixeramobim e também fora da mancha de inundação. O mapa de localização pode ser encontrado no Apêndice B.

Além disso, a cidade possui muitas escolas, um clube de eventos, igrejas, a base militar do corpo de bombeiros e muitas áreas descampadas principalmente à direita do curso do rio Quixeramobim. A maioria das suas construções são térreas, existindo alguns prédios de 3 e de 4 pavimentos.

Um dos problemas identificados nessa vistoria foi a presença de 3 empresas de rádio e o cemitério da cidade dentro da mancha de inundação, o que poderá dificultar a disseminação de informações referentes ao desastre, bem como a logística pós-desastre e o manejo de mortos.

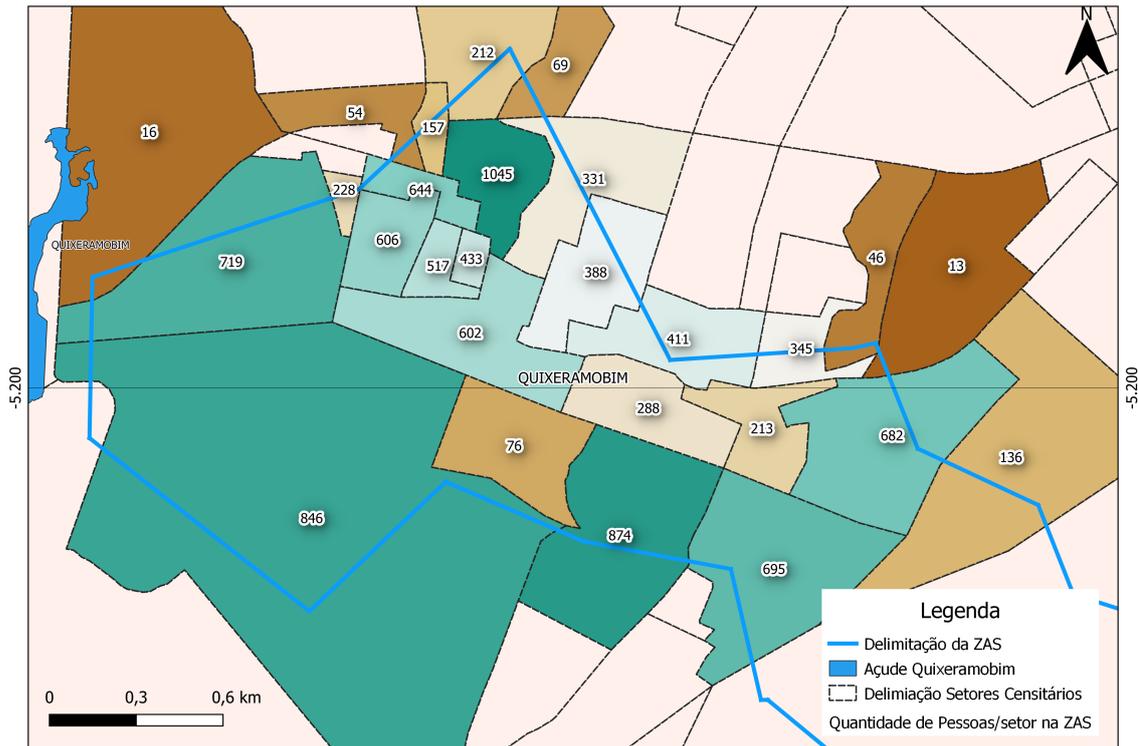
Tabela 7 – Total de pessoas a ser evacuado

Código do Setor	Nº Pessoas	Código do Setor	Nº Pessoas
231140505000001	411	231140505000033	288
231140505000002	602	231140505000034	388
231140505000003	331	231140505000035	1045
231140505000005	345	231140505000038	46
231140505000006	13	231140505000039	136
231140505000008	682	231140505000040	213
231140505000009	695	231140505000043	76
231140505000010	874	231140505000044	433
231140505000011	846	231140505000045	644
231140505000012	517	231140505000047	54
231140505000013	606	231140505000049	212
231140505000014	719	231140505000050	157
231140505000015	228	231140505000056	69
231140505000016	16	-	-
TOTAL			10646

Fonte: Autora (2020)

Após o cálculo das áreas dos setores censitários que podem ser acometidos, obteve-se um total de 10.646 pessoas a serem evacuadas em toda a região atingida pela mancha, sendo 2.491 pessoas moradoras da margem direita do rio e 8.155 moradores da região à esquerda do rio. A representação visual dos dados apresentados nas Tabelas 7,8 e 9 podem ser vistos na Figura 29.

Figura 29 – Representação da quantidade de pessoas existente na ZAS por setor censitário.



Fonte: Autora (2021)

Tabela 8 – Capacidade dos alojamentos localizados à direita do rio

Total de Evacuados		2491
Local	Área	Capacidade
Quadra Poliesportiva	1007	1007
Salão Paroquial	704	704
Igreja de São Francisco	393	393
Igreja Assembleia de Deus	179	179
Chácara Santa Helena	997	997
TOTAL	-	3280

Fonte: Autora (2020)

No caso dos setores localizados à direita da calha do rio, houve a delimitação de 6 possíveis construções que poderão servir de abrigo e de duas áreas descampadas que poderão

ser usadas para a instalação de abrigos provisórios, bem como para nortear as rotas de fuga para a população que se encontra nos setores mais próximos à ombreira direita da barragem. Considerando-se $1m^2$ por pessoa, os abrigos possuem capacidade para receber confortavelmente todas as pessoas que serão evacuadas.

Tabela 9 – Capacidade dos alojamentos localizados à esquerda do rio

Total de Evacuados		8155
Local	Área	Capacidade
Igreja S. Vicente de Paulo	564	564
EEF Dona Maria Araujo	1944	1944
Praça Humberto Bezerra	1803	1803
EEMTI Cel. Humberto Bezerra	8663	8663
Descampado	1589	1589
EEFTI Maria Vidal Pimentel	4011	4011
Clube Arreio de Prata	3835	3835
Polo UAB do sertão central	7513	7513
Associação Atlética Banco do Brasil	4874	4874
Igreja Universal	639	639
Colégio Perpetuo Elpidio Ferreira	1032	1032
Projeto Assembleia de Deus	935	935
Base Militar Do Corpo de Bombeiros	1847	1847
Liceu de Quixeramobim	11052	11052
Salão Comunitário Vila São Paulo	274	274
INSS	466	466
EEEP Dr. José Alves da Silva	11000	11000
Pista de Bicicross	7800	7800
Hotel Veredas do Sertão	2000	2000
TOTAL	-	71841

Fonte: Autora (2020)

No caso dos setores localizados à esquerda, houve o levantamento de pelo menos 19 locais aptos a receber até 8 vezes a quantidade total a ser evacuada na região. O mais importante nesse levantamento foi a tentativa de que houvessem abrigos próximos a cada trecho ao longo da mancha para permitir a evacuação em tempo hábil. A localização dos abrigos por ser vista no Apêndice A.

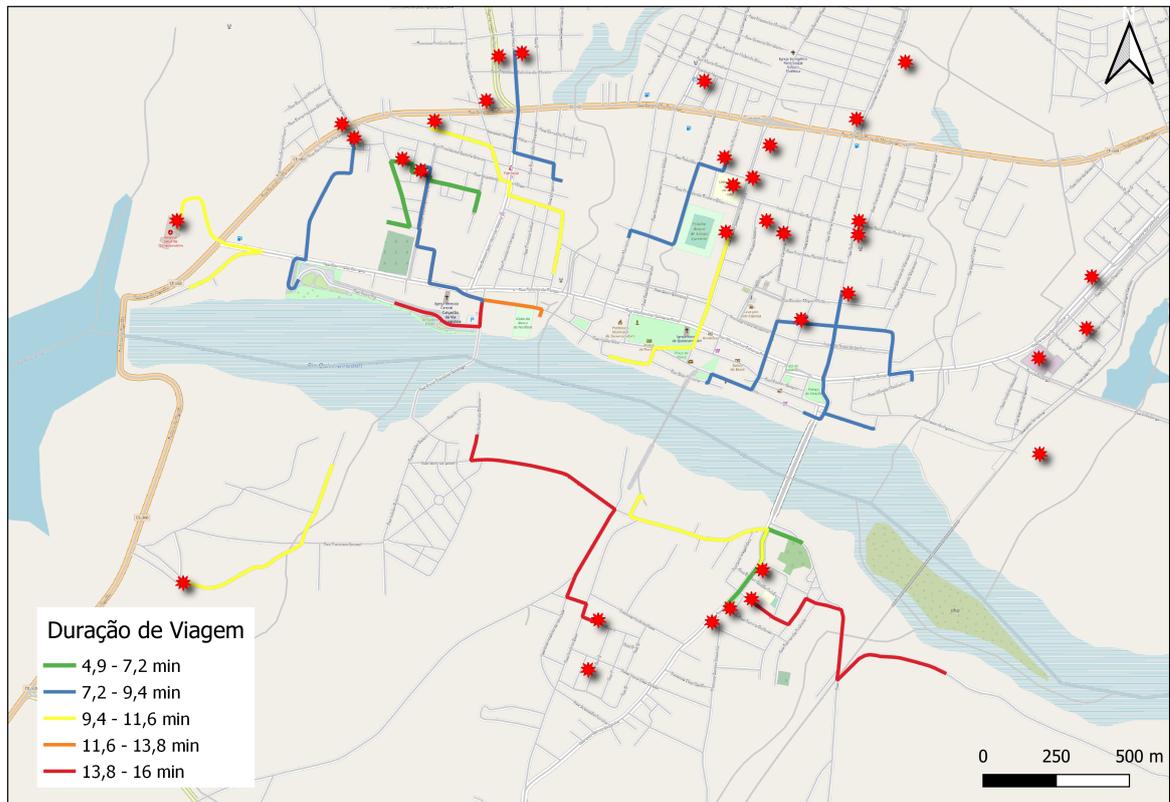
Por fim, não houve a demarcação de alojamentos verticais que resistissem à onda, devido à impossibilidade do cálculo da lâmina em cada seção, bem como à elevada vulnerabilidade social dos setores acometidos diretamente que pode resultar em instabilidade durante a inundação e à inexistência de bancos de dados sobre a idade dos imóveis da cidade.

4.4 ROTA DE FUGA

Ao todo, foram traçadas 20 rotas de fuga ligando os centroides aos abrigos mais próximos fora da mancha de inundação e podem ser vistas na Figura 30 de acordo com as classes

de duração de viagem. Existiram setores censitários que, devido à densidade populacional e ao tamanho, foram beneficiados com mais de uma rota.

Figura 30 – Representação das rotas de acordo com a duração da evacuação.



Fonte: Autora (2020)

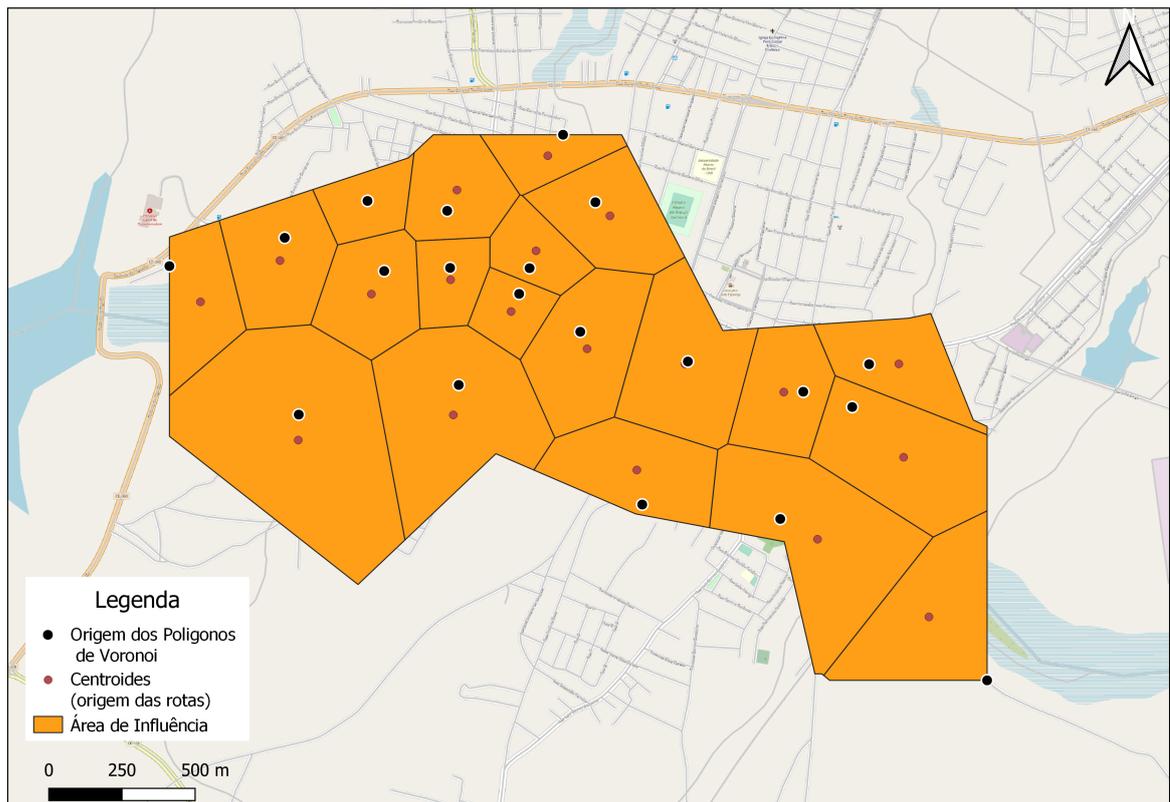
Ao serem calculados os períodos de evacuação de cada uma, foram encontradas rotas que permitiriam a evacuação em 4,9 minutos e rotas que necessitariam de um período de evacuação acima de 16 minutos. Ao se comparar os intervalos de tempo calculados com a duração da evacuação para o primeiro cenário, considerando o tempo de alerta (TA) de 8 minutos, foi constatado que apenas 3 rotas conseguiriam evacuar a região em tempo hábil (TE = 7 min).

Já para o Tempo de Alerta de 13 minutos e, por consequência, um Tempo de Evacuação de 2 minutos, nenhuma das rotas seria capaz de evacuar em tempo hábil. Isso mostra que o período de alerta à população é, de fato, importante no resultado satisfatório dos planos emergenciais.

Além disso, as rotas que tiveram os custos de viagem mais altos ou foram aquelas localizadas nos setores de piores Índices de Integração de Vias e que, por falta de caminhos alternativos, tiveram que ser utilizadas como rotas de fuga, ou aquelas localizadas nos setores mais isolados de possíveis pontos de abrigo.

A análise da quantidade de pessoas impactadas foi permitida pela densidade demográfica dos setores e pela área de influência de cada ponto de origem de rota. Ou seja, não foi considerada a quantidade de pessoas que seria beneficiada em pontos distintos ao longo do curso da rota, somente aquelas que partiriam da origem de cada segmento. Os Polígonos de Voronoi obtidos e os centroides considerados são apresentados na Figura 31.

Figura 31 – Áreas de influência por origem de rota



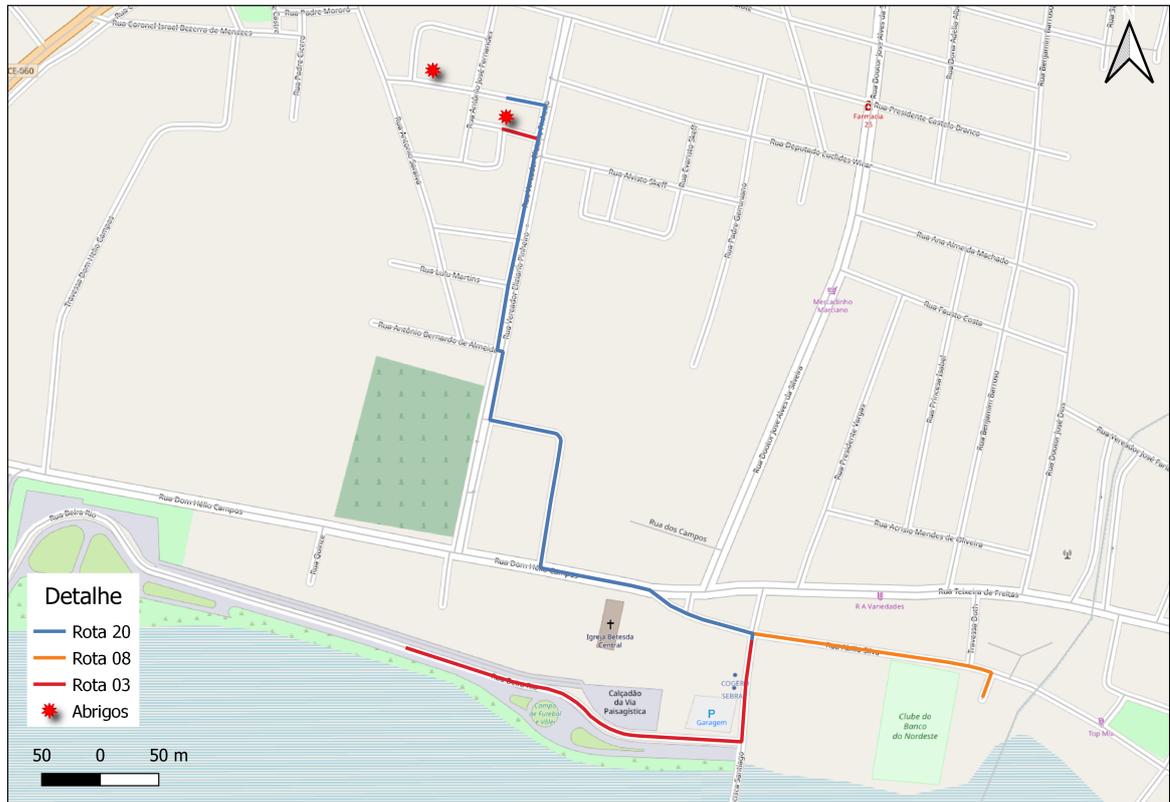
Fonte: Autora (2020)

Assim, foi concluído que as rotas traçadas, apesar de ter sido por critérios geométricos, permitiriam o escoamento de, aproximadamente, 97,6% da população a ser evacuada, considerando, apenas, a localização dos seus pontos de origem. Isso representa que as rotas estão bem distribuídas no espaço, mas não se pode inferir que possam ser aplicadas, na prática, da forma como estão, visto que ainda existe um percentual da população não atendida e que o experimento foi feito de forma simplificada, sem considerar a análise da capacidade das vias, que seria necessário principalmente para as regiões em que houve superposição de rotas, como apresentado na Figura 32.

Por fim, é importante ressaltar que a análise foi feita para a velocidade mais baixa possível, comparando os estudos e o manual do HCM2000, para enquadramento de grupos de

mobilidade reduzida, como idosos, crianças e deficientes. A tabela contendo a duração das viagens e a quantidade de pessoas impactadas por rota consta no Apêndice B.

Figura 32 – Detalhe das rotas que se sobrepõem



Fonte: Autora (2020)

5 CONCLUSÕES

O presente estudo buscou desenvolver um método simples e aplicável para traçar rotas de fuga em caso de evacuação de regiões acometidas por falhas em barragens. Não só para o traçado da rota de fuga em si, os resultados servem de base tanto para análise da vulnerabilidade regional como para a avaliação dos critérios que devem ser levados em consideração durante a evacuação e a alocação dos abrigos.

Primeiramente, por meio do estudo de vulnerabilidade da região, foi possível calcular indicadores que foram úteis para avaliar aqueles setores mais deficientes e que seriam mais severamente degradados com o desastre, mostrando os setores que mais são afetados com a elevada densidade demográfica, com a falta de serviços básicos e com a baixa integração das vias. Baseados em ferramentas SIG, tanto os dados dos indicadores como os mapas temáticos gerados serviram para auxiliar as discussões referentes à emergência.

A partir disso, foi possível calcular a quantidade de pessoas que deveriam ser evacuadas e quais os setores que seriam afetados pelo desastre, sendo obtida uma quantidade de 10.646 pessoas na Zona de Autossalvamento. Apesar de, como apresentado, a responsabilidade dos procedimentos de evacuação na ZAS ser de responsabilidade do empreendedor, devido à elevada densidade populacional a jusante da barragem, propõe-se que haja cooperação com outras instituições, como a Defesa Civil e o Exército, para viabilizar tanto o planejamento como a condução da evacuação.

A determinação dos pontos de encontro trouxe uma perspectiva sobre quais ambientes podem ser usados como abrigos para as pessoas evacuadas, tendo sido, ainda, escolhidos os terrenos descampados onde poderiam ser construídos abrigos temporários durante a reabilitação das famílias. Durante essa fase, foram calculadas as capacidades de resposta desses abrigos, obtendo-se uma quantidade 6 vezes maior que o número de vítimas que, porventura, necessitariam ser abrigadas.

Além disso, identificou-se que as empresas de rádio da cidade serão severamente afetadas e poderá prejudicar a comunicação do aviso às famílias, sendo importante que haja o planejamento de um plano de comunicação e alerta em caso de emergência, com a definição de estratégias diferentes de disseminação da informação, como o uso de sirenes, carros de som e mensagens de texto.

Com a delimitação dos abrigos, foi possível simular as rotas de fuga para o caso mais crítico de evacuação, considerando a velocidade mínima de 1,2 m/s. Com isso, foram

traçadas 20 rotas de fuga, mas apenas 3 responderam ao tempo limite de evacuação de 7 minutos, considerando um tempo de alerta de 8 minutos e um tempo de reação de 15 minutos, e nenhuma respondeu ao cenário constituído pelo tempo de alerta de 13 minutos, reiterando a importância da comunicação eficiente.

Isso mostra que, nas condições consideradas, a evacuação a pé seria severamente dificultada, podendo ser, inclusive, ineficiente. Ademais, o cálculo da quantidade de pessoas atendidas mostrou que aproximadamente 97,6% da população a ser evacuada seria beneficiada com as rotas. Assim, pode-se constatar que as rotas foram bem distribuídas ao longo do espaço, mas que ainda existem, considerando os dados do Censo de 2010, mais de 250 pessoas desatendidas, sendo necessário reavaliar o método utilizado.

Para melhorar esse quadro, seria possível considerar a construção de abrigos verticais ou o mapeamento de edifícios resistentes à inundação ao longo da ZAS, bem como o planejamento da evacuação considerando outro modo de transporte, como ônibus público, e o planejamento, em campo, de caminhos alternativos nos setores que possuem baixa acessibilidade.

Vale ressaltar que a proposta apresentada se refere a um estudo preliminar com limitações teóricas e práticas, não existindo a garantia de que o método seja completamente válido para gerar rotas de fuga, cabendo, assim, aperfeiçoamentos, validações e adequações às situações diferentes.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como contribuição para trabalhos futuros, propõe-se a análise da vulnerabilidade regional de forma mais coerente com a realidade do município, levando em consideração os dados qualitativos, como a avaliação da capacidade de resposta da comunidade e das instituições por meio de pesquisas de campo conforme discorrido em 2.3.1.1, desprezados pelo presente estudo devido à dificuldade de obtenção dos dados em campo, bem como o levantamento do número de deficientes e do número de pessoas com acesso à rede de telecomunicação por setor censitário.

Além disso, na fase da delimitação dos abrigos, é necessário que haja um estudo de viabilidade dos pontos selecionados no quesito acesso à sistemas de energia elétrica e de água após o desastre, bem como da consideração, em cada ponto ao longo da calha do rio, da lâmina de água para averiguar as construções que poderão ser usadas como abrigos verticais.

Ainda, não foram considerados os estudos de atração e de geração de viagens, nem

de capacidade de via que poderia incrementar a análise do fluxo e, assim, das vias mais indicadas para evacuação levando em consideração o horário da emergência.

Por fim, a análise seria mais realista mediante a consideração de limites geográficos menores que os setores censitários; os dados do Censo atualizados; o aprimoramento da delimitação da ZAS de acordo com o tempo de chegada da onda pelo estudo de inundação; a avaliação da viabilidade do uso de transportes públicos para a evacuação; a proposição de um método para cálculo de influencia das rotas que seja mais representativo e o desenvolvimento de softwares que sejam capazes de aplicar os passos descritos no presente estudo.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. B. de. Curso sobre operação e segurança de Barragens. **Curso sobre Operação e Segurança de Barragens**, p. 120, 1997.
- AMARAL, R.; ROSSINI-PENTEADO, D.; RIBEIRO, R. R.; MARCHIORI, D. G.; SANTORO, J. O mapeamento de áreas de risco como instrumento para gerenciamento de desastres naturais : Exemplo no município de Poá (SP). 2007.
- ANGGRAINI, A. R.; OLIVER, J. GESTÃO DE RISCOS E INDICADORES DE PREPARAÇÃO: ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE PALMEIRA/PR. **Journal of Chemical Information and Modeling**, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2019. ISSN 1098-6596.
- BALBI, D. A. F. Metodologias para a elaboração de planos de ações emergenciais para inundações induzidas por barragens. Estudo de Caso: Barragens de PETI - MG. p. 353, 2008.
- BIRKMANN, J.; TEICHMAN, K. V.; WELLE, T.; GONZÁLEZ, M.; OLABARRIETA, M. O risco não percebido para as zonas costeiras da Europa : Os tsunamis e a vulnerabilidade de O risco não percebido para as zonas costeiras da Europa : Os tsunamis e a vulnerabilidade de Cádiz , Espanha *. 2011.
- BRASIL, A. **Moradores de Brumadinho negam ter recebido orientações de evacuação**. 2019. Disponível em: <https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2019/02/02/interna_gerais,1027263/moradores-de-brumadinho-negam-ter-recebido-orientacoes-de-evacuacao.shtml>. Acesso em: 02 ago, 2020.
- BRITO JUNIOR, I. de; ROSIS, C. H. V. de; CARNEIRO, P. V.; LEIRAS, A.; YOSHIZAKI, H. T. Y. Proposta de um programa de treinamento de desastres naturais considerando o perfil das vítimas. **Ambiente & Sociedade**, v. 17, n. 4, p. 153–176, 2014.
- CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. M. d. C. Secas no nordeste do Brasil: origens, causas e soluções. **Fourth Inter-American Dialogue on Water Management**, n. November, p. 10, 2001. ISSN 1098-6596. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/9326>>.
- CELORIO-SALTOS, J. C.; GARCÍA-ARIAS, J. M.; GUERRA-LUQUE, A. B.; BARRAGAN-ARCA, G.; TOULKERIDIS, T. Vulnerability analysis based on Tsunami hazards in crucita, central coastal of Ecuador. **Science of Tsunami Hazards**, v. 37, n. 3, p. 225–263, 2018. ISSN 87556839.
- DRACHLER, M. de L.; LOBATO, M. A. de O.; LERMEN, J. I.; FAGUNDES, S.; FERLA, A. A.; DRACHLER, C. W.; TEIXEIRA, L. B.; LEITE, J. C. de C. Desenvolvimento e validação de um índice de vulnerabilidade social aplicado a políticas públicas do sus. 2014. Disponível em: <<https://www.scielo.org/pdf/csc/2014.v19n9/3849-3858/pt>>.
- FELTRIN, T. F. Procedimentos para gestão de ocorrência de inundações em cidades de pequeno e médio portes com o uso de SIG e logística humanitária. Estudo de caso: cidade de Jahu, SP. 2014.
- FRANÇA, M. J. Caracterização E Modelação Numérica E Experimental Da Ruptura Provocada Por Galgamento De Barragens De Enrocamento. p. 160, 2002.
- GHESQUIERE, F.; PRASHANT, P. P.; REID, R. C. J.; KELLETT, J.; KC, S.; CAMPBELL, J. O relatório sendai: Gerenciando riscos de desastres para um futuro resiliente. 2017.

AIDR. Emergency management planning for floods affected by dams. **Australian emergency manual series**, Manual 23, p. 28 TS – WorldCat M4 – Citavi, 2009. Disponível em: <<http://www.worldcat.org/oclc/656986726>>. Acesso em: 03 abr, 2020.

ANA. Elaboração de Estudos para Concepção de um Sistema de Previsão de Eventos Críticos na Bacia do Rio Paraíba do Sul e de um Sistema de Intervenções Estruturais para Mitigação dos Efeitos de Cheias nas Bacias dos Rios Muriaé e Pomba e Investigações de Campo Correlatas. 2013.

ANA. Curso segurança de Barragens - tipos de barragens. 2016. Disponível em: <<http://progestao.ana.gov.br/portal/progestao/destaque-superior/boas-praticas/curso-de-seguranca-de-barragens-daee-1/aula-3-segur-barragem-2016tipo.pdf>>.

ANA. **Guia de Orientação e Formulários do Emergência – PAE**. [S.l.: s.n.], 2016. IV. 132 p. ISBN 9788582100400.

ANA. **Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem - Volume II**. [S.l.: s.n.], 2016. II. 218 p. ISBN 978-85-8210-036-3.

ANA. Resolução n 236, de 30 de janeiro de 2017. estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do plano de segurança da barragem, das inspeções de segurança regular e especial, da revisão periódica de segurança de barragem e do plano de ação de emergência, conforme art. 8, 9, 10, 11 e 12 da lei n 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a política nacional de segurança de barragens - pnsb. 2017. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2017/236-2017.pdf>>. Acesso em: 03 out, 2020.

ASA. **Semiárido: é no semiárido que a vida pulsa!** 2017. Disponível em: <<http://www.asabrasil.org.br/semiario>>. Acesso em: 26 abr, 2020.

CBDB. **Apresentação das Barragens**. 2013. Disponível em: <<http://cbdb.org.br/apresentacao-das-barragens>>. Acesso em: 21 mar, 2020.

CENAD. Orientações para apoio à elaboração de Planos de Contingência Municipais para barragens. p. 33, 2016.

ICOLD. **Role of dams**. s.d. Disponível em: <https://www.icold-cigb.org/article/GB/dams/role_of_dams/role-of-dams#div_comms>. Acesso em: 24 ago, 2020.

IPEA. **Metodologia do IVS**. s.n. Disponível em: <<http://ivs.ipea.gov.br/index.php/pt/sobre>>. Acesso em: 19 jan, 2021.

KEYS, C. Preparing for Dam-Failure Flooding : the Development of Special Emergency Plans in New South Wales. **ANCOLD Bulletin**, n. 90, p. 15–24, 1992.

LAURIANO, A. W. Estudo de ruptura da barragem de Funil: comparação entre os modelos Fldwav e Hec-Ras. p. 251, 2009.

LAVRAS, A. L. L. de M. PORTFÓLIO ACADÊMICO ARQUITETURA EFÊMERA : ABRIGOS TEMPORÁRIOS PARA SITUAÇÕES EMERGENCIAIS ANNA LETÍCIA LADEIRA DE MELO LAVRAS-MG PORTFÓLIO ACADÊMICO ARQUITETURA EFÊMERA : ABRIGOS TEMPORÁRIOS PARA LAVRAS-MG. 2020. Disponível em: <<http://localhost:80/jspui/handle/123456789/580>>.

LIMA, F. S.; OLIVEIRA, D. D. Formação de clusters para o gerenciamento da cadeia de suprimentos em operações humanitárias. p. 55–68, 2014.

MARABOTI, A.; AQUINO, D.; BENNETT, G.; ABREU, P.; FRAGOSO, R.; FONTAINHA, T. C.; LEIRAS, A. Comportamento Populacional Na Evacuação Em Massa. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, p. 103, 2018. ISSN 2238-8753.

MARCELINO, E. V. Desastres naturais e conceitos básicos. **Inpe-Crs**, p. 37, 2008.

MARENGO. **Mudanças climáticas e os efeitos sobre a biodiversidade (MMA).pdf**. [S.l.: s.n.], 2007. ISBN 8577380386.

MENESCAL, R. d. A.; FONTENELLE, A. d. S.; MIRANDA, A. N. d.; PERINI, D. S.; PITOMBEIRA, E. d. S.; VIANA, F. L.; GONDIM, J.; COSTA, M. P. d.; AQUINO, M. D. d.; FIGUEIREDO, N. N. d.; CRUZ, P. T. d. C.; CARVALHO, R. V. d.; OLIVERIA, S. K. F. d.; FRANCO, S. R.; MOTA, S.; VIEIRA, V. d. P. P. B.; OLIVEIRA, Y. C. d. A Segurança e a gestão de recursos hídricos . 2005.

OLIVEIRA, L. C. S. de. SIMULAÇÃO DO ROMPIMENTO DE BARRAGENS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO BANABUIÚ-CE FORTALEZA. 2018. ISSN 00142972. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/40525>>.

OLIVEIRA, N. C. C. de. A grande aceleração e a construção de barragens hidrelétricas no Brasil. **Varia Historia**, v. 34, n. 65, p. 315–346, 2018. ISSN 0104-8775.

PERINI, D. S. Estudo Dos Processos Envolvidos Na Análise De Riscos de Barragens de Terra. 2009.

PINHO, G. M.; OLIVEIRA, L. C.; ROCHA, M. d. M.; BARROS, A. P. B. G. Mapeamento da vulnerabilidade de evacuação em caso de desastres naturais empregando a Sintaxe Espacial. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 71, n. 2, p. 328–366, 2019. ISSN 0560-4613.

POZZER, C. P.; COHEN, S. C.; COSTA, F. D. S. O Marco de Ação de Hyogo aplicado à gestão de risco de inundação no Brasil e em Portugal. **Territorium**, n. 21, p. 49–70, 2014. ISSN 0872-8941.

Prefeitura de Quixeramobim. **Dados do Município: História**. 2020. Disponível em: <<https://www.quixeramobim.ce.gov.br/omunicipio.php>>. Acesso em: 05 jan, 2021.

SCHEER, S.; GARDI, A.; GUILLANDE, R.; EFTICHIDIS, G.; VARELA, V.; VANSSAY, B. D.; COLBEAU-JUSTIN, L. **Manual de Planificação de Evacuação por Tsunami**. [S.l.: s.n.], 2011. ISBN 9789279190896.

SILVA JUNIOR, A. R. da. **Indicadores de vulnerabilidade, risco socioambiental e educação ambiental para a prevenção e mitigação de desastre natural na Bacia Hidrográfica DO Tucunduba, Belém-PA**. 2018.

SILVA, M. A. S. da; BRITO JUNIOR, I. de; OLIVATO, D.; MARCHEZINI, V. Definição participativa de rotas de fuga em caso de movimento de massa no bairro do Britados – Campos do Jordão – SP Michael Ademilson Santos da Silva. 2016.

SORIANO, E. Os desastres naturais , a cultura de segurança e a gestão de desastres no Brasil. **V seminário Internacional de Defesa Civil**, 2009.

SOUZA, J. C.; KUWER, P. AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES PARA ESVAZIAMENTO EMERGENCIAL DE ESPAÇOS QUE REÚNEM GRANDE PÚBLICO: ESTUDO DE CASO NO PARQUE VILA GERMÂNICA, BLUMENAU/SC. v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2019. ISSN 1098-6596.

TRINDADE, A.; TEVES-COSTA, P.; CATITA, C. A GIS-based analysis of constraints on pedestrian tsunami evacuation routes: Cascais case study (Portugal). **Natural Hazards**, Springer Netherlands, v. 93, n. s1, p. 169–185, 2018. ISSN 15730840. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11069-017-3152-4>>.

TRINDADE, A. D. S. Risco de tsunami da cidade de Lagos: Avaliação da vulnerabilidade e modelação de rotas de evacuação numa abordagem SIG. **Pontificia Universidad Catolica del Peru**, 2014.

WISEU, M. T. F. **Segurança dos vales a jusante de barragens: metodologias de apoio à gestão do risco**. 420 p. Tese (Doutorado), 2006. Disponível em: <<http://repositorio.lnec.pt:8080/jspui/handle/123456789/15575>>. Acesso em: 05 mar, 2020.

WISEU, T.; ALMEIDA, A. B. d. **Gestão do risco nos vales a jusante de barragens**. 33-42 p. Tese (Doutorado), 2011.

APÊNDICE A – LOCALIZAÇÃO DOS ABRIGOS

Figura 33 – Identificação da barragem e dos hospitais na região.



Figura 34 – Identificação dos abrigos localizados à direita do rio



Figura 35 – Identificação dos abrigos localizados à esquerda do rio



Fonte: Autora (2020)

APÊNDICE B – ROTAS DE FUGA

Tabela 10 – Relação entre distância percorrida, duração de viagem e quantidade de pessoas atendidas por rota

Id_ rota	DS (m)	V (m/s)	DT (seg)	DT(min)	TE (min)	Nº_evacuados
1	707	1.2	589.2	9.8	7	213.6
2	672	1.2	560	9.3	7	293.7
3	1040	1.2	866.7	14.4	7	385.7
4	355	1.2	295.8	4.9	7	194.1
5	388	1.2	323.3	5.4	7	1130.1
6	831	1.2	692.5	11.5	7	686.5
7	572	1.2	476.7	7.9	7	993.9
8	884	1.2	736.7	12.3	7	164
9	603	1.2	502.5	8.4	7	562.8
10	734	1.2	611.7	10.2	7	356.4
11	534	1.2	445	7.4	7	438.7
12	533	1.2	444.2	7.4	7	276.9
13	568	1.2	473.3	7.9	7	674.9
14	612	1.2	510	8.5	7	78.4
15	740	1.2	616.7	10.3	7	1796.7
16	1150	1.2	958.3	16	7	321.3
17	728	1.2	606.7	10.1	7	731.3
18	433	1.2	360.8	6	7	796.6
19	1040	1.2	866.7	14.4	7	198.1
20	629	1.2	524.2	8.7	7	98.1
—	—	—	—	—	Total	10392.0
—	—	—	—	—	Percentual	97.61%

ANEXO A – VULNERABILIDADE DAS EDIFICAÇÕES

Métodos de classificação da vulnerabilidade das edificações propostos por, respectivamente, Celorio-Saltos *et al.* (2018), Scheer *et al.* (2011).

b) Qualitative and quantitative analysis of indicators

The qualitative and quantitative analysis of the variables has been carried out based on the rating of the indicators, based on a numerical scale of 0.50 to 2, which assigns a level of importance to each of the indicators. Where for the case of independent variables: 2.00 is very important, 1.50 is important, 1.00 is moderately important, 0.50 is unimportant. The result has been the distribution of numerical values for the qualification of each of the indicators, according to their classification as indicated in Tables 2-11.

Table 2: Parameters for the qualification of indicators of the vulnerability of the physical structure. Based on PNUD-SNGR (2011).

Indicators	Evaluation parameters	Qualification
Structural system	Reinforced concrete	0,5
	Metallic structure	1
	Wooden structure	2
	Structure of cane (light)	2
	Mixed (wood, concrete, metallic)	1,5
Type of housing	Reinforced concrete slab	0,5
	Metal cover	1
	Beams made of wood and zinc	1,5
	Beams of cane and zinc	2
	Wood and tile beams	1,5
Number of floors	1 floor	2
	2 floors	1,5
	3 floors	1
	4 floors	0,5
	More than 4 floors	0,5
Construction age	Between 1950 and 1980	2
	Between 1980 and 2000	1
	After 2000	0,5
Closeness to the sea	Less than 500 meters from the beach	2
	Between 501 to 1000 meters from the beach	1,5
	Between 1001 and 1500 meters from the beach	1
	More than 1500 meters from the beach	0,5
Site topography	Flat	2
	Below the level of the road	1,5
	On the level of the road	1
	On the escarpment	0,5
Relative state	Good	0,5
	Acceptable	1
	Regular	1,5
	Bad	2

6.3 Classificação de edifícios de acordo com a sua vulnerabilidade

De modo a determinar a vulnerabilidade dos edifícios, o primeiro passo consiste na adopção de uma descrição padronizada de tipos de edifícios, para qualificar todas (ou quase todas) as construções na costa expostas a perigo de tsunamis. Depois do tsunami de 26 de Dezembro de 2004, vários autores (Leone et al., 2006; Garcin et al., 2007; Reese et al., 2007) propuseram tipologias de edifícios, de modo a detalhar funções de vulnerabilidade. A tipologia de edifícios proposta pelo consórcio de projecto SCHEMA deriva principalmente de Leone e tal. (2006) mas foi completada e alargada de forma a ser mais geral e incluir pelo menos todas as construções presentes nos cinco locais de estudo do projecto SCHEMA.

Foram definidas quatro classes principais de edifícios (divididas em sub-classes), com base nas suas características estruturais ou resistência, tal como se segue:

Tabela 6:

- I. Construções ligeiras;
- II. Construções de alvenaria e betão simples;
- III. Construções em betão armado;
- IV. Outras construções.

Tabela 6: Classes de vulnerabilidade de edifícios

Classe		Tipos de edifício	Número de pisos
I. Ligeiros	A1	Construção ligeira de praia ou frente marítima em <i>madeira e barro</i>	0 ou 1, raramente 2
	A2	Construções muito ligeiras sem design. Cabanas construídas em <i>madeira, barro e cobertura em zinco</i>	Apenas 1
II. Alvenaria e betão simples	B1	<i>Tijolo não reforçado, cimento, paredes de argamassa, pedra aparelhada e alvenaria</i>	1 ou 2
	B2	Construções ligeiras e muito concentradas: <i>madeira e materiais argilosos</i>	1 ou 2
	C1	Edifícios individuais, moradias: <i>tijolo com colunas reforçadas e preenchimento com alvenaria</i>	1 ou 2
	C2	Edifícios com paredes executadas em <i>pedra de lava</i> , normalmente de formato ortogonal, alternando com <i>tijolos de barro</i>	1 ou 2
	D	Moradias e edifícios colectivos, residenciais ou comerciais: <i>betão simples</i>	1 a 3
III. Betão armado	E1	Estruturas residenciais ou colectivas, escritórios, parques de estacionamento, escolas: <i>betão armado, estrutura metálica</i>	0 a 3
	E2	Estruturas residenciais ou colectivas, escritórios, parques de estacionamento, escolas, prédios: <i>betão armado, estrutura metálica</i>	> 3
IV. Outros	F	Edifícios portuários e industriais, hangares: <i>betão armado, estrutura metálica</i>	Indiferenciado
	G	Administrativos, históricos, religiosos, outros	Indiferenciado

6.4 Classificação de danos em edifícios

O nível de danos em edifícios pode ser classificado através de uma escala qualitativa por ordem crescente de severidade, desde “sem danos” a “colapso total”. Foi adoptada uma escala de 6 graus pelo SCHEMA, baseada nos trabalhos de Leone e tal. (2010), Perirs (2007) e Garcin e tal. (2007), indicada na Tabela 7. É igualmente sugerida a possibilidade de utilização do edifício no período imediatamente posterior ao desastre (coluna 3), bem como a forma como se espera que as técnicas de observação por satélite detectem e avaliem o nível de danos (coluna 4).

Tabela 7: Nível de danos em edifícios (escala adaptada pelo projecto SCHEMA)

Nível de danos	Danos na estrutura	Utilização como abrigo / utilização pós-crise	Detecção por observação via satélite
D0 Sem danos	Sem danos significativos	Abrigo / ocupação imediata	Sem sinais de danos visíveis no edifício e envolvente.
D1 Danos ligeiros	Sem danos estruturais – danos menores, reparáveis: <i>destacamento de estuque, fissuração ligeira, danos em janelas e portas.</i>	Abrigo / ocupação imediata	Quase imperceptível
D2 Danos importantes	Danos importantes mas não estruturais: <i>deslocamento ou colapso de paredes ou painéis sem comprometer a integridade estrutural, deixando as fundações parcialmente expostas.</i>	Evacuação / Não adequado para ocupação imediata, adequado após reparações	Danos na cobertura pouco visíveis. Outros danos não visíveis.
D3 Danos graves	Danos estruturais que podem afectar a estabilidade do edifício: <i>deslocamento ou colapso de alvenaria, colapso parcial de pisos, fissuração grave e colapso de secções da estrutura devido a assentamentos.</i>	Evacuação / Demolição requerida, uma vez que é inadequado para ocupação	Danos não visíveis ou pouco visíveis, se as coberturas não tiverem sido removidas.
D4 Colapso parcial	Danos graves que comprometem a integridade estrutural, colapso parcial do edifício	Evacuação / Demolição total requerida	Visível
D5 Colapso	Colapso total: <i>fundações e lajes visíveis e expostas</i>	Evacuação	Bastante visível

Exemplos de danos causados em edifícios por ondas de tsunami e a associação aos níveis de danos definidos na Tabela 6 são fornecidos através das fotos reunidas na Figura 23. Referem-se aos efeitos do tsunami devastador de 2004 no Oceano Índico.



Figura 23: Exemplos de danos em edifícios, associados à matriz de danos proposta na Tabela 6. As fotos são do tsunami de 2004 no Oceano Índico (fontes: Leone et al. 2010, Perirs 2006 e Garcin et al. 2007)