

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

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

Brenda Arielly Mendonça Rodrigues¹; Bruno Vieira Bertoncini² & Tereza Margarida Xavier de Melo Lopes³

RESUMO: Devido ao grande volume de material acumulado, uma situação de falha em barragem pode ocasionar desastres com perdas imensuráveis nos vales a jusante. Assim, surgiu a necessidade de propor um 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. Foram considerados, primeiramente, os estudos existentes sobre vulnerabilidade da região, determinando os passos para verificar os locais mais vulneráveis e a quantidade de pessoas a ser evacuada, bem como delimitar a Zona de Autossalvamento e os abrigos com as respectivas capacidades. Ainda, foi feito 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 na região da Barragem de Quixeramobim (Ceará), existindo limitações práticas e teóricas. Por fim, foram determinadas as rotas que 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. O presente artigo é consequência direta do projeto de graduação da autora Brenda Arielly Mendonça Rodrigues, sob orientação direta do Prof. Dr. Bruno Vieira Bertoncini.

ABSTRACT: Due to the high volume of accumulated material, an emergency situation involving a dam may cause a disaster with immeasurable losses in the downstream valleys. 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, determining the steps to check the most vulnerable places and the number of people to be evacuated, as well as delimit the self-rescue zone and the shelters with these respective capabilities. Were also plotted escape routes in a geometric way, considering the shorter route, the calculation of the process duration and the number of affected people. Being an experiment, this process took place in a simplified way from the Quixeramobim Dam's region (Ceará), presenting practical limitations. Finally, were determined which routes 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 the pattern fit. This article comes from graduation's project of the author Brenda Arielly Mendonça Rodrigues, under the direct guidance of Dsc. Bruno Vieira Bertoncini.

Palavras-Chave – Rota de Fuga; Segurança de Barragem; Evacuação.

1) Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará-Campus do Pici, brendaarielly@alu.ufc.br

2) Professor do Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará-Campus do Pici, bruviber@det.ufc.br

3) Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará-Campus do Pici, terezamelo@alu.ufc.br

1. INTRODUÇÃO

As barragens são empreendimentos importantes para a devida gestão dos recursos hídricos e contenção de rejeitos. Apesar dos seus benefícios, é válido lembrar que a construção e a operação dessas estruturas está associada a possíveis danos às cidades vizinhas em caso de falha, sendo necessário elaboração de métodos de planejamento e de operação de evacuação, levando em consideração não só a área inundada, como também as características sociais, a velocidade da onda proveniente da ruptura, as áreas que serão afetadas e o tempo necessário para a retirada, em segurança, de populações afetadas, principalmente daquelas que vivem na chamada Zona de Autossalvamento (ZAS) e que não podem esperar as ações da Defesa Civil (AIDR,2009).

É importante destacar, porém, que apesar das imposições legislativas tanto por parte da Política Nacional de Segurança de Barragem (PNSB) como pela Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), chamou-se atenção, em 2019, no Brasil para o desastre com a barragem Mina Córrego do Feijão (Brumadinho – MG) que vitimou fatalmente centenas de pessoas, principalmente devido à falta de orientações para evacuação, e implicou em prejuízos econômicos e ambientais irreparáveis,

Com isso, entende-se que ainda há carência na elaboração dos planos de evacuação de áreas de risco, desde a orientação da população até o traçado de rotas, 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).

O presente estudo tem como objetivo propor uma metodologia para o traçado de rotas de fuga em caso de ruptura de barragem, verificando a vulnerabilidade das áreas por meio da mancha de inundação e apontando para os potenciais locais de abrigo, com as respectivas rotas que permitirão a fuga em tempo hábil.

2. CONSTRUÇÃO DOS PLANOS DE EVACUAÇÃO

De acordo com Scheer *et al.* (2011), um Plano de Evacuação é um documento que deve ser usado para nortear as ações de fuga e de resgate de forma segura durante e após a notificação da emergência. Em caso de desastres por tsunamis, por exemplo, tem-se o objetivo de sempre guiar as pessoas para locais seguros, conhecidos como pontos de encontro ou abrigo, e priorizar a agilidade 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).

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

- 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);
- Sinalização dos locais de apoio, como abrigos e rotas de fuga, bem como preparação e treinamento da população (SCHEER *et al.*, 2011);
- Ação da resposta durante a ocorrência do desastre (SCHEER *et al.*, 2011).

Então, para que se estabeleçam os procedimentos e as áreas seguras para evacuar a população, é importante considerar não somente o foco e a proporção do desastre, como também os parâmetros que interferem na vulnerabilidade social e regional.

2.1. Vulnerabilidade regional

Entende-se por vulnerabilidade regional o conjunto de condições determinadas pelos fatores físicos, sociais, econômicos e ambientais que aumentam a suscetibilidade da população, de bens e de propriedades ao impacto dos perigos (AMARAL *et al.*, 2007).

Para Pinho *et al.* (2019), quando relacionada à procedimentos de evacuação, pode ser analisada por meio de indicadores que representam a exposição ao desastre e a capacidade de resposta da população, levando em conta, por exemplo, o número de evacuados, a forma urbana e seus graus de integração e, assim, a acessibilidade.

Esses parâmetros podem ser desde dados quantitativos originados de censos feitos pelo governo, até dados qualitativos obtidos mediante pesquisas de campo, sendo necessário, pelo fato da análise geralmente ser feita a nível municipal, que os dados sejam organizados por unidades menores e mais detalhadas, como setores censitários ou, caso seja viável, como quadras (PINHO *et al.*, 2019).

2.2. Pontos de encontro

Os Pontos de Encontro (PE) podem ser entendidos como os locais para onde as pessoas deverão ir em caso de fuga. Para a localização segura desses pontos, deve-se adequar a tomada de decisões ao estudo de vulnerabilidade da região e da mancha de inundação, pois devem estar, de acordo com CENAD (2016), fora da Área de Impacto Direto e possuir acesso a insumos e serviços básicos para manter a segurança dos evacuados até estabilização da situação.

Então, é importante que os PE suportem uma quantidade mínima de pessoas, levando em consideração o número de vítimas, a localização de estradas de acesso, a existência de sistemas de serviço de comunicação e de iluminação, bem como de kits de primeiros socorros, de água e de alimentação (SCHEER *et al.*, 2011). Os abrigos podem ser de dois tipos, sendo eles:

- Horizontais: Previamente definidos para 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 (SCHEER *et al.*, 2011). Geralmente, são localizados em zonas não inundadas;
- Verticais: Construções tipo edifícios classificados conforme sua vulnerabilidade, dependendo do tipo construtivo, da idade e da altura. Podem permanecer rodeados por água e devem suportar danos severos na estrutura por objetos possivelmente carregados pela onda. Normalmente, são implementados quando as rotas até os abrigos horizontais não permitem uma evacuação em tempo hábil (TRINDADE, 2014).

2.3. Rotas de fuga

O estudo sobre a construção de rotas depende de critérios como propósito, determinação do espaço 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.

Já para os modelos macroscópicos, há a utilização de grafos. Trindade (2014) utiliza essa teoria para evacuar a região em caso de tsunamis devido à necessidade de minimizar o custo do deslocamento mediante a maximização do 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;
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 congestionamento 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 permitir a liberdade de deslocamento requerida.

Houve, ainda, o acréscimo dos atributos de custo dado como *output* de cada rota, sendo eles os dados de tempo e de distância percorrida. Como o tempo depende da velocidade de deslocamento e esta, por se tratar de pedestres, depende do tipo de via, 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 com base no centroide da região a ser evacuada e no local do abrigo e foram classificadas de acordo com o tempo do percurso, sendo este confrontado com o tempo necessário para a evacuação (TE). 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) do usuário foi considerado, em média, como 10 minutos e o Tempo de Chegada da Onda (TTT - *Tsunami Travel Time*) foi dado, pela simulação feita, como um valor mínimo entre 25 e 30 minutos. A expressão usada é apresentada na Equação 1 e, tendo sido usado um TTT de 30 minutos, foi obtido um TE igual a 12 minutos.

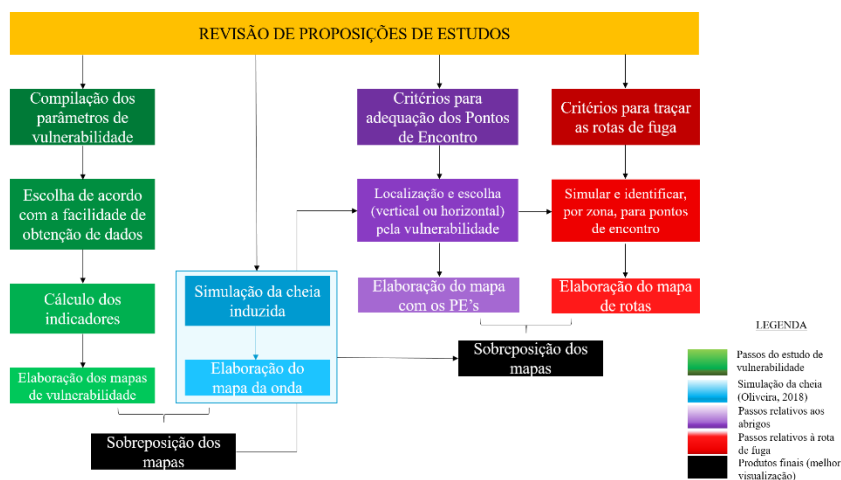
$$TE = TTT - TA - TR \quad (1)$$

Trindade *et al.* (2018) utilizaram um método semelhante ao descrito, adotando de forma generalizada a velocidade de 1,4 m/s para um adulto e de 0,7 m/s em caso de existência de obstáculos tipo degraus e desníveis maiores que 15%; o tempo de aviso de 13 minutos e o de resposta de 15 minutos.

3. MÉTODO PARA ELABORAÇÃO DO PLANO DE EVACUAÇÃO

Os passos metodológicos para o encaminhamento da proposta do presente trabalho são descritos abaixo e seguem o fluxo apresentado na Figura 1. Vale ressaltar que trata-se de um experimento simplificado, com várias limitações, não sendo indicado o uso dos resultados na prática.

Figura 1 - Fluxograma demonstrativo dos passos metodológicos



3.1. Mancha de inundação

A determinação da mancha de inundação consiste em uma etapa primordial para a determinação das comunidades e das áreas que poderão ser atingidas caso haja uma ruptura da barragem.

3.2. Vulnerabilidade regional

A avaliação da vulnerabilidade regional se deu mediante o cálculo, para cada setor censitário estabelecido pelo IBGE (com a finalidade de padronizar, visto que todos os municípios possuem esta organização), de quatro indicadores: Índice de Vulnerabilidade Social, Índice de Densidade Demográfica, Índice de Integração de Vias e Índice de Vulnerabilidade de Evacuação. Os respectivos cálculos foram baseados na proposta feita por Pinho et al. (2019) e seus resultados variam de 0 a 1, representando, respectivamente, os melhores e os piores casos.

O Índice de Vulnerabilidade Social (IVS) representa o impacto das características sociais no processo de evacuação, considerando o grau de exposição e a capacidade de resposta das pessoas.

Seu cálculo se deu pela sequência das Equações 2, 3 e 4, e considera que todos os parâmetros influenciam igualmente a vulnerabilidade regional.

$$iv = \frac{\text{Casos de maior vulnerabilidade}}{\text{Quantidade de Habitantes}} \quad (2)$$

$$IV = \frac{iva+ivEs+ivL+ivEE+ivR+ivI+ivEd+ivG}{8} \quad (3)$$

$$IVS = \frac{IV_{do\ setor} - IV_{menor}}{IV_{maior} - IV_{menor}} \quad (4)$$

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.

O índice de Densidade Demográfica (IDD), cujo objetivo consiste em avaliar o impacto da densidade populacional nas ações de fuga, teve seu cálculo dado pela Equação 5 e a padronização se deu pelo mesmo cálculo proposto na Equação 4.

$$IV = \frac{\text{Quantidade de moradores}}{\text{Área em km}^2} \quad (5)$$

Já o Índice de Integração de Vias (IIV) avalia o impacto, por meio da Sintaxe Espacial, da disposição e da integração das vias no processo de evacuação durante o desastre. Primeiramente foi obtido o mapa axial por meio do *OpenStreetMap* via QGis com sistema de coordenadas UTM Sirgas 2000 - ZONA 24S. 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 (Integração [HH] R3).

Após isso, exportou-se o arquivo para o QGis com o objetivo de extrair as extensões de cada via, fazendo um buffer de 7 metros, bem como de classificar as vias de 1 a 5 de acordo com a integração. O indicador foi calculado por meio da ponderação apresentada na Equação 6:

$$IIV = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i EXT_i)}{\sum_{i=1}^n (EXT_i)} \quad (6)$$

Para: P_i = Classes das vias (1 a 5);
 EXT_i = Extensão da via.

Por fim, o Índice de Vulnerabilidade de Evacuação (IVE) é calculado pela composição dos três anteriores e demonstra a vulnerabilidade dos setores censitários em caso de emergência e de possível evacuação. Pinho et al(2019) consideram que ele será impactado igualmente pelo IVS, pelo IDD e pelo IIV e, por isso, seu cálculo se dá pela média aritmética dos três índices, como apresentado na Equação 7.

$$IVE = \frac{IVS+IDD+IIV}{3} \quad (7)$$

3.3. Determinação dos pontos de encontro

A escolha dos Pontos de Encontro/Abrigos se deu de acordo com critérios propostos em outros estudos, sendo utilizado como ferramenta principal o Google Earth e seguindo a sequência de ações apresentada abaixo:

1. Identificação, pelo Google Earth, dos possíveis locais de abrigo, como escolas, igrejas, ginásios e hospitais;
2. Sobreposição da mancha de inundação com o mapa de setores censitários para identificar a quantidade de pessoas a ser evacuada;
3. Verificação da oferta de alojamento para o provável número de evacuados.

Com a sobreposição dos mapas, foram identificados todos os setores que deverão ser evacuados, dos quais 8 terão seus territórios completamente evacuados, visto que se encontram inteiramente na mancha de inundação, e 19 não serão vitimados completamente. Assim, foi possível calcular a quantidade de pessoas a ser evacuada na região, a partir das respectivas Densidades Demográficas. Já a capacidade dos abrigos foi calculada considerando uma área de 1m² por pessoa para socorro imediato.

3.4. Traçados das rotas de fuga

As rotas de fuga puderam ser feitas por meio da ferramenta "caminho mais curto" do *software* QGis, que traça o roteiro mais curto ou o mais rápido entre dois pontos, a partir da localização dos abrigos e dos setores que deveriam ser evacuados.

No caso em estudo, considerou-se a hipótese de o deslocamento ser feito a pé e para isso foi usada, como *input* da função, a velocidade proposta pelo método 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 de menor caminho por não sofrer influência de horário e nem de fluxo. O traçado se deu da seguinte forma:

- Criou-se uma *shapefile* de pontos localizados nas regiões de maior densidade de construção, mediante observações 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;
- Foram recortados, assim, 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.

De cada centroide foram traçadas rotas para os abrigos mais próximos, sendo escolhida aquela de menor custo de viagem dado pela própria ferramenta usada. Foi calculada a distância que os pedestres deverão caminhar em cada rota para possibilitar a obtenção do tempo esperado de percurso de forma simplificada pelo movimento uniforme, sem considerar acelerações.

Os períodos de percurso de cada rota foram comparados ao tempo de evacuação esperado, conforme apresentado na Equação 1, considerando o Tempo de Chegada da Onda como 30 minutos baseado na definição proposta pela ANA para a Zona de Autossalvamento. 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.

Os polígonos que originaram os centroides foram utilizados como área de influência para o cálculo da quantidade de pessoas possivelmente assistidas por cada rota.

4. EXPERIMENTO E RESULTADOS

Como forma de avaliar a aplicabilidade do método, foi adotado um estudo hipotético tomando por base informações referentes à barragem Quixeramobim localizada na cidade de Quixeramobim-CE. Porém, vale ressaltar que os resultados, embora úteis para avaliação do método, não guardam, necessariamente, relação com a situação local real, pois algumas das informações foram geradas por meio de suposições e premissas, dado que as mesmas não constam de bases de dados oficiais e, no presente trabalho, não houve coleta de dados em campo. Assim, os resultados obtidos, se implementados, não necessariamente surtirão efeito esperado, devido às simplificações adotadas para fins de experimento.

4.1. Mancha de Inundação

Como o estudo, 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 proposta por Oliveira (2018). A ZAS foi delimitada no *software* livre QGIS, de acordo com a determinação da Agência Nacional de Águas (ANA) que aponta como um dos critérios a consideração do trecho de 10 km a partir do pé da barragem em estudo.

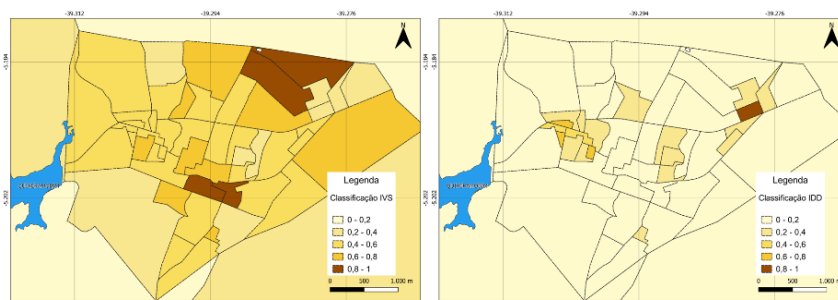
É importante salientar que optou-se por esse método devido à limitação de dados e para simplificar o estudo, mas existe outra condição que depende do tempo de chegada da onda e que pode representar mais fielmente a situação.

4.2. Vulnerabilidade

Com relação ao IVS, ao observar os setores que serão completamente acometidos, 5 apresentaram taxa de vulnerabilidade alta e 2 muito alta, mostrando que nessas regiões deve haver maior cautela durante a evacuação. Além disso, lembrando que durante um desastre é provável que ocorra o colapso de muitos sistemas básicos, essas características podem impedir que essas regiões sejam escolhidas para abrigar, sendo necessário escoar os moradores para setores mais distantes, causando maior dispêndio na evacuação.

No que tange ao IDD, verificou-se que na região inundada existem setores com maiores densidades demográficas que, provavelmente, necessitarão de maior quantidade de rotas para escoar a população em tempo hábil. Já nas áreas periféricas, em que a densidade é menor, foram encontrados muitos ambientes descampados que podem ser aproveitados para o acolhimento das vítimas. Os mapas do IVS e do IDD podem ser vistos na Figura 2.

Figura 2 - Mapas Temáticos IVS e IDD



O padrão de integração das vias se opõe aos encontrados anteriormente, mostrando que os setores mais periféricos possuem vulnerabilidade mais alta. Esse padrão é comum para as cidades, visto que o centro, geralmente, concentra os maiores motivos de atração de viagens e, por isso, possui maior integração de vias.

Aquelas regiões em que as vias não são bem integradas e, assim, possuem maiores IIV, terão maiores dificuldades para evacuar a população, apresentando menos opções de roteiros e maior vulnerabilidade. Vale ressaltar que a região localizada a direita da barragem 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.

Ainda, existe um setor censitário a jusante e mais distante do centro que possui IIV muito próximo a 1 (cor marrom escuro), caracterizando uma situação de alta vulnerabilidade, mas a região possui uma densidade demográfica bem reduzida e não foram identificadas quaisquer construções ao longo da mancha inundada.

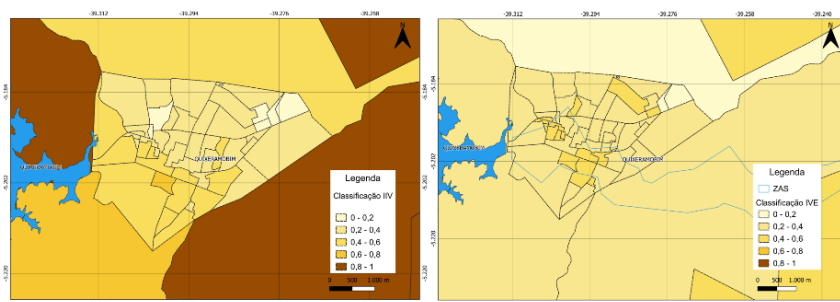
A partir dos indicadores calculados e dos mapas gerados, foi possível perceber que dos 59 setores acometidos com o desastre, 17 terão Índice de Vulnerabilidade de Evacuação (IVE) médio e

os 42 restantes, baixo e muito baixo, mostrando que a região tem potencial para responder bem às medidas emergenciais. Os mapas temáticos do IIV e do IVE são apresentado na Figura 3.

4.3. Abrigos

Inicialmente, foi possível identificar os prédios públicos que não poderão ser usados como abrigos, visto que serão inundados, como a Prefeitura, a Secretaria da Saúde e o Tribunal da Justiça, bem como dois hospitais, um localizado na ombreira esquerda da barragem que possui terreno livre para receber evacuados e suporte para socorrer vítimas, e o Hospital Regional do Sertão Central localizado há 6,39 km da barragem.

Figura 3- Mapas temáticos IIV e IVE



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. 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, a logística pós-desastre e o manejo de mortos.

Com o cálculo das áreas e das densidades demográficas dos setores censitários 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 Figura 4 apresenta um mapa temático em escala de cor da quantidade de pessoas por setor presente na ZAS.

Por fim, foram mapeados 24 possíveis locais de abrigo e, ao considerar a área de 1m² por pessoa, a capacidade total dos alojamentos resultou em 3.280 pessoas à direita e 71.841 pessoas à esquerda do rio, mostrando que os pontos de encontro conseguirão receber confortavelmente todas as possíveis vítimas.

4.4. Rotas de fuga

Foram traçadas 20 rotas de fuga ligando os centroides aos abrigos mais próximos e existiram setores censitários que, por causa da densidade populacional e do tamanho, foram beneficiados com mais de uma rota.

Ao se comparar os intervalos de tempo calculados com a duração da evacuação para 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 TE de 2 minutos, nenhuma das rotas permitiria a fuga. Isso mostra que o período de alerta à população é, de fato, importante no resultado satisfatório dos planos de emergência.

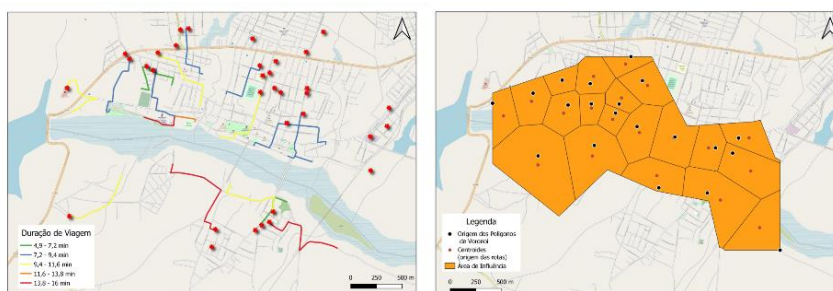
Além disso, as rotas que tiveram os custos de viagem mais altos ou foram aquelas localizadas nos setores de piores Índices de Integração de Vias e que, por falta de caminhos alternativos, tiveram que ser utilizadas como rotas de fuga, ou aquelas localizadas nos setores mais isolados de possíveis pontos 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, bem como as rotas de fuga são apresentados na Figura 4.

Foi concluído que as rotas traçadas, apesar do uso de critérios geométricos, permitiriam o escoamento de, aproximadamente, 97,6% da população a ser evacuada, representando que estão bem distribuídas no espaço, mas não se pode inferir que possam ser aplicadas na prática, visto 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.

Figura 4 - Rotas de fuga por duração de viagens e polígonos de Voronoi com centroides



5. CONCLUSÃO

O presente estudo buscou desenvolver um método simples e aplicável para traçar rotas de fuga em caso de evacuação de regiões acometidas por possíveis falhas em barragens. Não só para o traçado da rota de fuga, os resultados servem também 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, o estudo de vulnerabilidade da região possibilitou avaliar aqueles setores mais deficientes e que seriam mais severamente degradados com o desastre, bem como calcular a quantidade de pessoas que deveria ser evacuada 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, propõe-se que haja cooperação com outras instituições, como a Defesa Civil e o Exército, para viabilizar tanto o planejamento como a condução das ações de resposta.

A determinação dos pontos de encontro trouxe uma perspectiva sobre os ambientes possíveis de serem usados como abrigos para as pessoas evacuadas, tendo sido, ainda, calculadas as capacidades de resposta deles, resultando em uma quantidade 6 vezes maior que a quantidade de vítimas que, porventura, necessitaria de abrigo.

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. 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, constatando-se 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.

Como melhoria, 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 aperfeiçoamentos, validações e adequações às diferentes situações.

AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem à Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH) pelo fornecimento de informações que possibilitaram nortear o estudo.

REFERÊNCIAS

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.

BRITO JUNIOR, I. de; ROSIS, C. H. V. de; CARNEIRO, P. V.; LEIRAS, A.; YOSHIKAZI, 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.

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.

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

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>>.

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.

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.

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.