

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

HEC-LIFESIM: REVISÃO TEÓRICA E APLICAÇÕES PARA ESTIMATIVA DE PERDA DE VIDA NO CENÁRIO BRASILEIRO

Tiago Zanon da Silva¹; Masato Kobiyama²; Silvia Midori Saito³ & Roberto Fabris Goerl⁴

RESUMO – No Brasil, casos como as rupturas da barragem Fundão, em Mariana/MG e da barragem Córrego do Feijão, em Brumadinho/MG evidenciam uma gestão de risco deficiente e demonstram um passivo técnico a ser vencido na geração de planos de emergência. É importante que os planos incorporem previsões sobre a natureza mutante do risco, de forma a facilitar a tomada de ações baseadas em evidências antes que os eventos efetivamente ocorram. Modelos computacionais dinâmicos baseados em agentes, como o HEC-LifeSim, fornecem a capacidade de simular o comportamento dos indivíduos e das causas de fatalidades em um evento de ruptura, permitindo estimar os riscos para a população a jusante de um barramento. Frente a estas potencialidades, o presente trabalho apresenta uma revisão teórica do modelo HEC-LifeSim e uma avaliação dos trabalhos publicados no cenário brasileiro, com foco na identificação das adaptações adotadas na construção dos estudos e na reunião das principais conclusões e recomendações.

Palavras-Chave – Plano de Ação de Emergência, Rompimento de Barragem, Avaliação de Risco

INTRODUÇÃO

Apesar dos avanços legais desenvolvidos pela Lei nº 12.334/2010 de concepção da Política Nacional de Segurança de Barragens (BRASIL, 2010), ainda há uma significativa defasagem na implementação de seus instrumentos. A elaboração dos Planos de Segurança da Barragem e seus componentes, tais como o Plano de Ação de Emergência (PAE), encontram barreiras de natureza financeira e técnica que dificultam sua execução (ANA, 2020). Em vista a redução desse hiato no país, pesquisas na área de segurança de barragens apresentam-se como um dos fatores catalizadores. A busca pela difusão de metodologias mais informativas e confiáveis possibilita a obtenção de resultados de maior qualidade sem, necessariamente, implicar no aumento de investimentos financeiros.

O PAE é um requisito obrigatório para barragens com dano potencial associado médio e alto em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas e firma o compromisso de ação do empreendedor para com a proteção civil e a minimização do potencial de risco associado a barragem (BRASIL, 2010). No entanto, a busca de muitos empreendimentos pelo simples atendimento quantitativo aos itens previstos pela lei implica em um perigo real de que os planos desenvolvidos não descrevam cenários factíveis ou, então, não indiquem soluções eficazes para as respostas ao evento.

Clarke (1999), citado por Lumbroso *et al.* (2021) defende que muitas vezes, no processo de construção dos planos de emergência, torna-se mais fácil para as empresas e consultores produzirem documentos simbólicos e fantasiosos do que admitirem os riscos e as incerteza associadas aos eventos de rompimento. Estes documentos frequentemente caracterizam-se por: (i) realizarem declarações ou

1) Aluno do programa de pós-graduação em Desastres Naturais da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). E-mail: tiagozanons@gmail.com.

2) Professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). E-mail: masato.kobiyama@ufrgs.br.

3) Pesquisadora do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN). E-mail: silvia.saito@cemaden.gov.br.

4) Professor do Departamento de Geociências da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). E-mail: roberto.f.goerl@ufsc.br.

promessas que não podem ser cumpridas; (ii) afirmarem que os eventos prognosticados são compreendidos e podem ser controlados; (iii) não examinarem como os fatores humanos (vulnerabilidades) afetam a reposta da população às emergências; (iv) não analisarem, de forma satisfatória, os riscos existentes; (v) superestimarem a coordenação organizacional para gestão da emergência e suas implicações na sociedade; e (vi) descreverem uma sequência racional de eventos durante um desastre que não reflete, necessariamente, as incertezas quem poderão ocorrer. No Brasil, casos como as rupturas das barragens Fundão, em Mariana/MG e da barragem Córrego do Feijão, em Brumadinho/MG evidenciam a geração de documentação com estas deficiências (BRASIL, 2016; 2019) e demonstram um passivo técnico a ser vencido na geração dos PAEs.

É importante que os estudos incorporem a previsão sobre a natureza mutante do risco e facilitem a tomada de ações baseadas em evidências, antes que os eventos efetivamente ocorram. Conforme Jonkman (2007), existem diversos modelos que podem ser empregados para estimar os riscos para a população a jusante de um barramento, podendo ser resumidos em duas grandes categorias: (i) empíricos, quando os resultados de fatalidade são correlacionados exclusivamente com características de eventos passados; e (ii) dinâmicos, quando permitem simulações mais detalhadas do comportamento dos indivíduos e das causas de fatalidade. Nesse contexto, modelos dinâmicos baseados em agentes, como o HEC-LifeSim (USACE, 2020), fornecem a capacidade de simular cada pessoa, edifício e veículo em risco e sua interação com o escoamento da inundação.

A produção de estimativas precisas de fatalidades, dado as incertezas inerentes de todas variáveis envolvidas, é um desafio. Lumbroso *et al.* (2021) destaca que o valor da utilização de modelos complexos de perda de vidas não é estimar com exatidão o número de mortes, mas avaliar se intervenções nos processos de gerenciamento de emergência podem trazer uma diferença significativa na redução das prováveis fatalidades. Assim, a informação gerada pode ser incorporada na construção de PAEs mais eficazes.

O presente trabalho apresenta uma revisão teórica do modelo HEC-LifeSim e uma avaliação dos trabalhos publicados no cenário brasileiro, com foco na identificação das adaptações adotadas na construção dos estudos e na reunião das principais conclusões e recomendações.

HEC-LIFESIM

O HEC-LifeSim é um sistema de modelagem dinâmico que permite realizar a estimativa da perda potencial de vidas e dos danos econômicos causados por eventos de inundações (USACE, 2020). Através da simulação explícita das fases de alerta e de mobilização da população potencialmente exposta ao perigo, o modelo realiza predições da distribuição espacial de fatalidades junto as estruturas e vias de acesso da região atingida. Deste modo, a concepção do modelo centra-se em 2 questões: (i) se a população potencialmente atingida evacua com sucesso; e (ii) se a parcela que não consegue evacuar pode alcançar um abrigo adequado (Aboelata *et al.*, 2003).

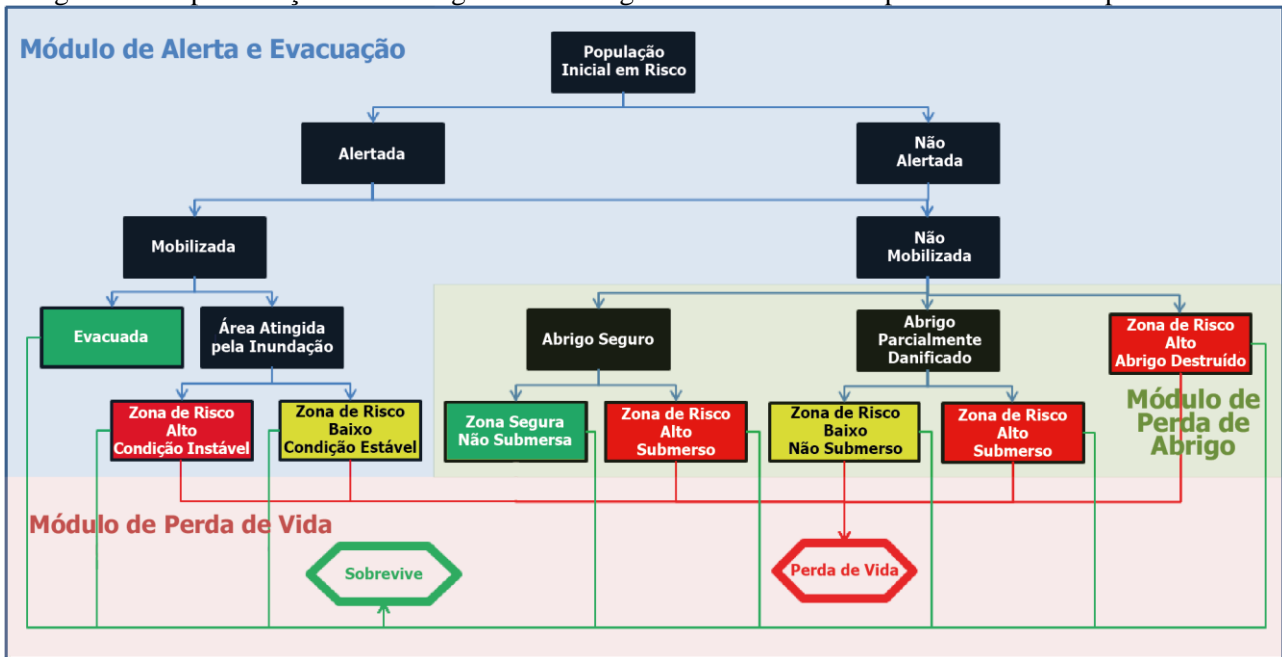
Em relação a sua estrutura, o modelo é construído sobre um banco de dados formado por camadas e tabelas provenientes de um Sistema de Informações Geográficas (SIG), onde 4 principais módulos interagem entre si, sendo eles: (i) Módulo de Propagação; (ii) Módulo de Perda de Abrigo; (iii) Módulo de Alerta e Evacuação; e (iv) Módulo de Perda de Vida (Figura 1).

Módulo de Propagação

Para execução desse módulo, dados obtidos em simulações de modelos hidráulicos de escoamento não permanente são importados para o HEC-LifeSim, de modo a estabelecer os limites de inundação, tempos de chegada, profundidades e velocidades necessários para análise dos módulos subsequentes. Os dados importados são então sobrepostos pelo programa junto as estruturas e estradas entre os passos temporais da simulação hidráulica, fornecendo o perigo apresentado aos agentes

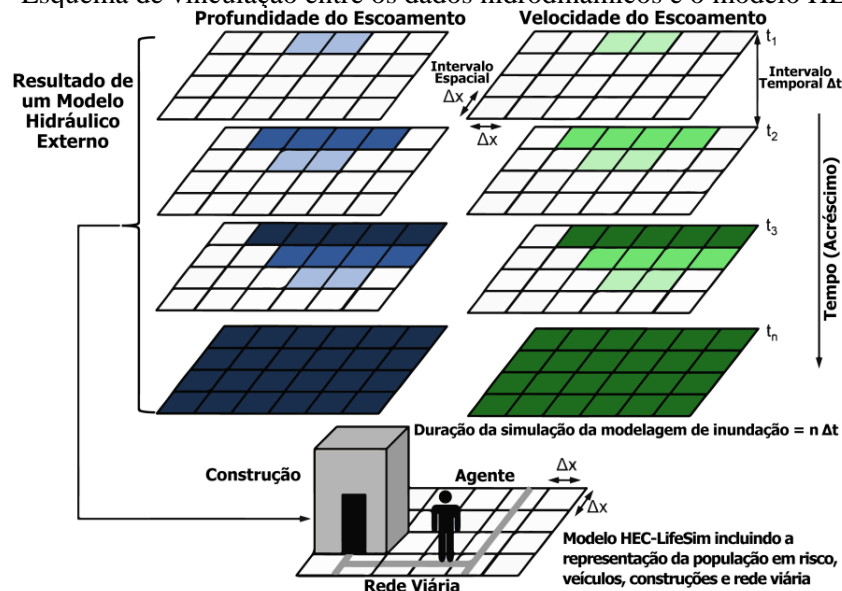
modelados (pessoas, veículos e construções). A Figura 2 ilustra como os resultados externos do modelo hidráulico estão vinculados ao sistema.

Figura 1 – Representação da abordagem metodológica do HEC-LifeSim para estimativa da perda de vida



Fonte: Adaptado de Aboelata e Bowles (2008)

Figura 2 – Esquema de vinculação entre os dados hidrodinâmicos e o modelo HEC-LifeSim



Fonte: Adaptado de Lumbroso *et al.* (2021)

Módulo de Perda de Abrigo

Esse módulo simula a exposição da população nas construções durante a passagem do evento de referência como resultado das consequências associadas aos danos estruturais, submersão e colapso das estruturas. Para tanto, torna-se necessário a inserção de um inventário de estruturas no modelo, por meio de um arquivo vetorial, onde para cada estrutura deve-se determinar informações associadas aos ocupantes, as características do material construtivo e ao tipo de ocupação. Este processo define parâmetros comuns para estruturas semelhantes, como condições de estabilidade de construção, incertezas de altura de fundação, critérios de evacuação e limites de submersão.

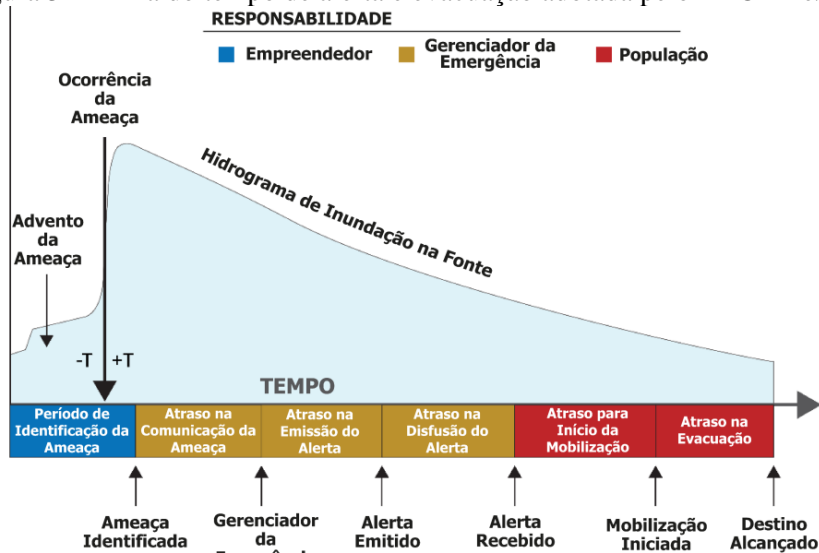
A análise de submersão refere-se à avaliação do nível d'água ocorrido nas estruturas e de suas consequências associadas quanto a probabilidade de sobrevivência. Quando os agentes simulados ficam presos em uma estrutura inundada, critérios relacionados ao tipo de construção e a existência de acessibilidade ao sótão e ao telhado das construções são utilizados para definir o limite entre as condições de zona risco baixo ou alto.

Em relação à análise de estabilidade física, as condições hidráulicas do evento são avaliadas para determinação das estruturas expostas que atingem os limites de colapso. Ao longo da simulação, se a profundidade e a velocidade atingirem um valor acima do limite funcional, a estrutura é colapsada, indicando uma zona de risco alto aos agentes envolvidos. No HEC-LifeSim, os critérios de estabilidade devem ser atribuídos a cada estrutura dentro do inventário antes da execução da simulação, sendo possível a inserção manual dos limiares ou a seleção de um conjunto pré-determinado de informações incluído no modelo, com base nos estudos de USACE (1985) e RESCDAM (2000).

Módulo de Alerta e Evacuação

Esse módulo descreve o processo do fluxo de informações e das tomadas de decisão que ocorrem desde a identificação do perigo até as ações protetivas adotadas pela população. As duas ações protetivas existentes no HEC-LifeSim são: (i) evacuação horizontal, por meio de locomoção a pé ou com veículos em direção a zonas seguras; e (ii) evacuação vertical, onde os agentes buscam refúgio junto aos pontos mais elevados de uma estrutura. Neste contexto, a partir do momento em que os avisos são emitidos, o módulo redistribui de forma dinâmica a população de seus locais iniciais para novos locais, atribuindo aos agentes diferentes categorias de zona de risco (segura, risco baixo e risco alto). De forma a ordenar o processo, o sistema fundamenta-se em uma linha do tempo de alerta e evacuação, onde são simulados os tempos de identificação e comunicação da ameaça, emissão e difusão do aviso, iniciação das ações de proteção e evacuação e transporte (Figura 3).

Figura 3 – Linha do tempo de alerta e evacuação adotada pelo HEC-LifeSim



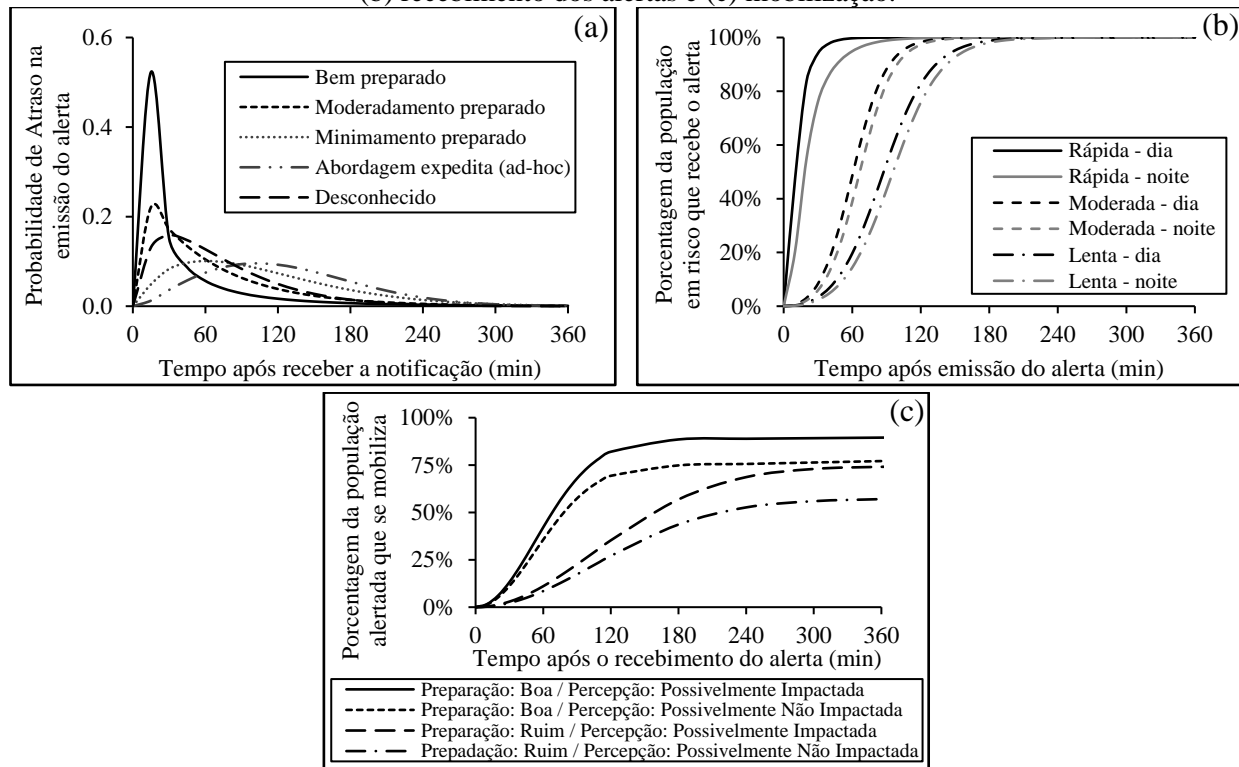
Fonte: Adaptado de USACE (2020)

Em síntese, o modelo baseia-se na identificação dos principais eventos da comunicação de desastres e dos períodos de tempo (atrasos) associados para alertar e evacuar a população em zonas de risco. O processo inicia-se na condição anterior a ocorrência da ameaça, o tempo entre o momento de identificação e a ocorrência efetiva é definido como o “Período de Identificação da Ameaça”, podendo ser negativo (anterior) ou positivo (posterior) a ocorrência do evento. Na sequência, o “Atraso na Comunicação da Ameaça” é o intervalo de tempo que leva para quem identificou a ameaça

alertar o agente responsável pela gestão da emergência (empreendimento ou órgão de defesa civil). Uma vez alertado, o agente deve notificar a população sobre o perigo, sendo este intervalo de elaboração e emissão do alerta tratado como o “Atraso na Emissão do Alerta”. Uma vez emitida a informação, o tempo para que ocorra a divulgação necessária para o público é referido como o “Atraso na Difusão do Alerta”. Por fim, o atraso entre o recebimento da informação e a efetiva tomada de decisão de ações protetivas pela população é denominado como o “Atraso para Início da Mobilização”. Em termos gerais, para que um processo de evacuação seja bem-sucedido, as tomadas de ações de proteção devem iniciar suficientemente a tempo para que a população em risco alcance os destinos seguros antes da chegada da ameaça.

Referentemente a definição dos intervalos de atraso na identificação e na comunicação da ameaça, o usuário deve realizar suas determinações com base nas características do evento e dos órgãos de gestão de emergência envolvidos. Por outro lado, em relação aos intervalos de atraso na emissão, recebimento dos alertas e mobilização, existe um conjunto de parâmetros pré-definido fundamentado nos estudos de Mileti e Sorensen (2017a, 2017b e 2017c) (Figura 4).

Figura 4 – Curvas de distribuição de probabilidade referentes aos cenários de (a) atraso na emissão do alerta, (b) recebimento dos alertas e (c) mobilização.



Fonte: Adaptado de Mileti e Sorensen (2017a, 2017b e 2017c)

Em relação à dinâmica de evacuação, o modelo simula o tráfego ao longo da rede viária, respeitando a cronologia de evacuação dos agentes. No processo de simulação, os motoristas podem tomar decisões sobre sua rota com base em dados computacionais que incluem as condições de tráfego, os locais de destino, a profundidade inundada nas estradas, o tipo de veículo e a própria classificação da estrada. Nos casos onde os veículos ou grupo de pessoas são atingidos pela inundação durante a evacuação, os critérios de estabilidade são aplicados e, caso excedidos, os agentes afetados são alocados na condição de zona de risco alto.

Módulo de Perda de Vida

Este módulo consiste na aplicação das curvas de distribuições de probabilidade de taxas de fatalidade para cada agente que foi alocado em uma zona de risco de inundação. Fundamentado nos

estudos desenvolvidos por McClelland e Bowles (2002) e atualizados por Aboelata *et al.* (2003), o modelo possui três classificações de zonas de risco de inundação:

- **Zona de Risco Alto:** regiões onde ocorrem as condições mais severas de níveis e velocidades e os critérios de estabilidade e submersão de pessoas, veículos e estruturas são excedidos. Nessas condições, as vítimas são normalmente arrastadas pela força d'água, soterradas por estruturas colapsadas ou ficam presas debaixo d'água, de modo que a sobrevivência depende, em grande parte, do acaso. A probabilidade de fatalidade nesta zona varia de 50% a 100%, com valor médio de 90%;
- **Zona de Risco Baixo:** condição onde os agentes estão expostos a enchentes relativamente calmas, com condições de níveis rasos e velocidades baixas e a estabilidade de pessoas e estruturas não é comprometida. Nesses termos, existe um risco residual devido ao potencial intrínseco de ocorrência de fatalidades quando há contato da população com a água em locais não destinados a tal interação. A probabilidade de fatalidade nesta zona varia de 0% a 50%, com valor médio de 10%;
- **Zona Segura:** áreas secas ou sem exposição a inundação. A probabilidade de fatalidade nestas zonas é virtualmente zero.

APLICAÇÕES NO CENÁRIO BRASILEIRO

Visando a caracterização das aplicações do HEC-LifeSim no cenário brasileiro, efetuou-se uma avaliação dos trabalhos publicados. A busca do material foi realizada junto as bases de dados do Google Acadêmico, Catálogo de Teses e Dissertações do portal da CAPES e Portal de Periódicos CAPES/MEC. O foco da análise foi a identificação das adaptações adotadas na construção dos estudos e a reunião das principais conclusões e recomendações.

Com objetivo de introduzir o modelo como recurso alternativo na busca de subsídios para a construção de planos de emergência integrados, Lara e Lohn (2019) desenvolveram um estudo piloto para um caso hipotético em uma região do estado de Minas Gerais. As metodologias adotadas para construção do modelo não foram detalhadamente descritas e os resultados tiveram enfoque na apresentação da interface e dos principais elementos de entrada do modelo, bem como também no processo de definição e seleção de curvas de mobilização e na ilustração dos cálculos de perdas de vida correlacionados com as análises de incertezas efetuadas pelo método de Monte Carlo. A discussão dos resultados tratou da identificação das correlações entre as incertezas temporais decorrentes dos critérios e parâmetros selecionados e a taxa de fatalidade dos cenários, ilustrando como é possível identificar aspectos a serem otimizados nos planejamentos de preparação. As conclusões apontaram para necessidade de um maior número de estudos de aplicação da metodologia no cenário nacional e definiram como requisito principal a necessidade de construção de uma base de dados integrada e confiável, a nível federal, para tornar a aplicação do modelo compatível com a realidade brasileira.

Matos e Eleutério (2019) realizaram uma comparação entre os resultados prospectivos sobre a mancha de inundação e perdas de vida associadas ao evento hipotético de ruptura da Barragem de Fundão (Mariana/MG) e os dados reais observados no desastre ocorrido em 2015. As informações populacionais e geográficas necessárias foram obtidas através dos produtos do censo demográfico realizado pelo IBGE no ano de 2010. A quantificação do número de habitantes e estruturas residenciais foi realizada com auxílio da Grade Estatística (IBGE, 2016) e a determinação da população idosa fundamentou-se na pirâmide etária do município. A localização efetiva dos domicílios foi definida a partir do cruzamento dos dados das grades com imagens de satélite, e o comportamento de distribuição da população em horários diurnos e noturnos foi estimado com base nas características econômicas do subdistrito. No tocante a definição dos pontos de encontro, dada a

ausência de informações no PAE da barragem, foram definidos pontos elevados e de fácil acesso por estradas, com distância mínima de 50 m da mancha de inundação máxima calculada. Em relação aos parâmetros de alerta e evacuação, 5 cenários foram simulados avaliando diferentes hipóteses de identificação e comunicação da ameaça, propagação de aviso e tomada de ações protetivas, tomando como base as curvas de distribuição de Mileti e Sorensen (2017a, 2017b e 2017c). Os resultados identificaram uma correlação entre a melhoria do sistema de alerta existente e a redução do número de perda de vidas, além disso, os valores de fatalidade calculados superestimaram o número de mortos devido à ruptura real, sendo uma das possíveis causas a não consideração das características reológicas do rejeito, implicando em um escoamento do fluido com maior velocidade e em uma diminuição do tempo da chegada da onda de ruptura.

Silva e Eleutério (2020) utilizaram o modelo HEC-LifeSim para simulação de alerta, evacuação e perdas de vidas associadas à ruptura hipotética da Barragem da Pampulha (Belo Horizonte – MG). Os dados populacionais e estruturais foram obtidos através do mapeamento da vulnerabilidade do vale a jusante realizado por Silva *et al.* (2020), cujas análises foram realizadas exclusivamente com dados secundários provenientes das bases do censo demográfico do IBGE de 2010 e do Município de Belo Horizonte. O tratamento dos dados censitários e o subsequente levantamento das populações em domicílios foi executado por meio da utilização da grade estatística (IBGE, 2016). A caracterização das construções e da população foi efetuada com auxílio dos microdados do censo, produto que contém as informações levantadas nas entrevistas domiciliares (IBGE, 2010a). É importante destacar que devido ao caráter de sigilo dos informantes da pesquisa, as informações são agrupadas em áreas de ponderação formadas pela união de setores censitários, de modo que a caracterização da população na região afetada foi arranjada proporcionalmente e distribuída de forma homogênea em função de sua inserção nos agrupamentos existentes. No tocante a variação da distribuição populacional durante o dia e a noite entre residências, locais de atividades econômicas e equipamentos (ensino, saúde e assistência social), foram utilizadas variáveis de educação e trabalho dos microdados em associação com dados da prefeitura para descrição do fenômeno.

A definição dos parâmetros de alerta e evacuação foi fundamentada em dois cenários distintos: um eficiente e outro ineficiente em relação a preparação da população para reagir à emergência de ruptura da barragem. As curvas de difusão de alerta e mobilização de Mileti e Sorensen (2017a, 2017b e 2017c) foram utilizadas para reprodução dos cenários e uma análise de sensibilidade do impacto relacionado ao tempo entre a identificação da ameaça e missão do alerta foi conduzido, adotando-se uma distribuição uniforme de 0 a 24h com fim no início da ruptura. Complementarmente, incorporou-se ao modelo a malha viária proveniente do *OpenStreetMap* e estabeleceram-se pontos de encontro fora da área inundável, de modo a orientar vetorialmente o deslocamento no modelo. Além disso, a evacuação foi definida como ocorrendo 50% a pé e 50% em veículos automotivos. Os resultados encontrados apontaram para o efeito de redução nas fatalidades ocorridas à medida que em que se incrementam os sistemas de alerta e a capacidade de mobilização local. Constatou-se também a existência de faixas limites de tempo de antecipação do alerta, em relação à ocorrência do rompimento, para obter-se uma redução significativa da perda de vida, com destaque para correlação entre a preparação da população e os benefícios decorrentes da antecipação. As conclusões enfatizaram a criticidade relativa do cenário diurno, associada a uma densidade maior da população transitando pela área de risco e a consequente dificuldade de evacuação devido às condições de tráfego. Por fim, também foi destacado o potencial da metodologia para redução de fatalidades por meio da identificação de processos a serem otimizados nas atividades de preparação.

Silva (2020) avaliou a aplicabilidade de dois modelos de estimativa de perdas de vidas com princípios diferentes para inundações provenientes das rupturas de barragens de rejeitos: o modelo empírico RCEM (Reclamation's Consequence Estimating Methodology) (USBR, 2015) e o modelo dinâmico baseado em agentes HEC-LifeSim. Para tanto, dois casos de rupturas ocorridos em Minas

Gerais foram analisados: São Francisco (Miraí) e Fundão (Mariana). No estudo, a determinação da população e da quantidade de domicílios utilizou o produto grade estatística (IBGE, 2016), alocando geograficamente as residências com auxílio de imagens de satélite e considerando uma distribuição homogênea da população em toda extensão de sua respectiva grade. A definição das demais tipologias de construção foi realizada por meio da análise dos mapas e descritivos dos setores censitários. Para caracterização dos domicílios e da população, foram utilizadas as amostras de domicílios e de pessoas existentes nos microdados do censo (IBGE, 2010a), com subsequente ponderação das informações disponíveis por agrupamento de setores censitários na região afetada. O processo de seleção das variáveis das amostras dos microdados e caracterização da população e das construções foi realizado com emprego do software de estatística e ciência de dados *Stata*. A malha viária da região foi obtida por meio da importação direta da base de dados do *OpenStreetMap* e os destinos seguros foram alocados em diversas regiões externas aos limites de inundações. A caracterização do módulo de alerta e mobilização fundamentou-se no conhecimento prévio de como ocorreram os processos de evacuação nos casos estudados e na construção de curvas de distribuição conforme as recomendações de Mileti e Sorensen (2017a, 2017b e 2017c). Foi considerada uma taxa de ocupação de três pessoas por veículo e a população evacuando 50% a pé e 50% em veículos. Para representação probabilística do modelo, foram realizadas 1.000 interações considerando as incertezas definidas nas etapas do processo de evacuação e as distribuições de probabilidade de taxas de fatalidade para cada zona de inundação.

Uma análise de sensibilidade também foi conduzida no estudo com objetivo de identificar os parâmetros que possuem maior impactos nas incertezas dos resultados da modelagem. Os aspectos analisados foram (i) consideração de ocorrência em diferentes períodos do dia em relação ao cenário base; (ii) verificação da influência do modo de evacuação a pé e em veículos; (iii) verificação do impacto do tempo de atraso na identificação da ameaça; e (iv) utilização das curvas de atraso da emissão do alerta, difusão e mobilização pré-existentes no modelo. De modo geral, a análise indicou a existência de limitações no modelo em representar situações com alta mobilização da população e com tempo de chegada da inundação muito curto. Também foi observada uma grande variabilidade na amostragem dos atrasos na emissão dos alertas e um consequente impacto na definição dos atrasos na mobilização, o que destacou a importância da correta determinação dos coeficientes relacionados à velocidade e ao tempo médio para mobilização.

As conclusões apontaram para o potencial da análise da estimativa de fatalidades, por meio modelagens computacionais e simulações matemáticas, como forma de subsidiar os planejamentos de emergência. Destacou-se que os resultados provenientes da utilização de dados censitários para realização da análise de vulnerabilidade e exposição se aproximaram dos valores observados em um dos eventos analisados, no entanto, a metodologia aplicada apresentou diversas limitações devido às inúmeras hipóteses adotadas, devendo a aplicação da mesma, para outros estudos, ser analisada com critério. Enfatizou-se também a necessidade de adequação do processo de caracterização das curvas de alerta e evacuação da população para o contexto brasileiro, bem como foi sugerida a alteração de critérios de estabilidade do modelo para condição de fluido não aquoso quando as aplicações estiverem associadas a rupturas de barragens de rejeitos de mineração.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Verifica-se que o HEC-LifeSim pode ser uma ferramenta eficaz para redução perda de vidas decorrentes de eventos de ruptura de barragens, possibilitando a análise de cenários virtuais de desastres e contribuindo, por meio de evidências, para a melhoria dos planos de emergência.

Conforme recomendações dos estudos analisados, os principais avanços necessários para uma aplicação consistente a nível nacional referem-se à criação de um banco de dados com informações integradas, atualizadas e confiáveis. No momento, o estado da arte das aplicações brasileiras

fundamenta-se na utilização dos dados derivados do censo demográfico de 2010. Esta metodologia, entretanto, carrega incertezas associadas a fatores como: (i) dados desatualizados; (ii) indisponibilidade de informações georreferenciadas (dado o caráter sigiloso do censo); e (iii) carência de detalhamento nas informações das construções, do comportamento laboral e do quantitativo da população com necessidades especiais.

A utilização de dados pré-existent no modelo referentes ao comportamento populacional deve também ser realizada com prudência. Estudos referentes a preparação dos órgãos gestores de emergência e ao comportamento da população em condições de desastres tornam-se necessários para adaptação da metodologia e melhoria dos resultados.

A tomada de iniciativas pelos governos estaduais e federais para criação de ferramentas integradas para análise de vulnerabilidade, inspirado em produtos como o RAPT da Agência Federal de Gestão de Emergências dos Estados Unidos (FEMA, 2021), bem como a manutenção da realização do censo demográfico pelo IBGE, adiado nos anos de 2020 e 2021 (STF, 2021), são ações fundamentais para viabilização da análise de modelos de perda de vida em microescala.

Destaca-se também a importância da realização de pesquisas na área de aplicação de modelos de análise dinâmica de perda de vida, de modo a fomentar sua utilização junto aos profissionais de segurança de barragens e contribuir para a gestão de riscos em nível nacional, subsidiando a inserção da estimativa de fatalidades no conteúdo mínimo necessário dos planos de ação de emergência.

REFERÊNCIAS

- ABOELATA, M., BOWLES, D. S. (2008). “*LIFESim: A tool for estimating and reducing life-loss resulting from dam and levee failures*” in Proceedings of the Association of State Dam Safety Officials. Dam Safety.
- ABOELATA, M., BOWLES, D. S., MCCLELLAND, D. M. (2003). “*A Model for Estimating Dam Failure Life Loss*” in Proceedings of the Australian Committee on Large Dams Risk Workshop. Launceston, Tasmania, Australia. Outubro 2003.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (2020). *Relatório de Segurança de Barragens 2019*. Brasília.
- BRASIL (2010). *Lei Nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 Política Nacional de Segurança de Barragens*. Diário Oficial da União. Brasília, DF.
- BRASIL (2016). *Relatório de análise de acidente: rompimento da barragem de rejeitos Fundão em Mariana - MG*. Ministério do Trabalho e Previdência Social. Brasília.
- BRASIL (2019). *Relatório Final da CPI do Rompimento da Barragem de Brumadinho*. Câmara dos Deputados. Brasília.
- CLARKE, L. (1999). *Mission improbable: Using fantasy documents to tame disasters*. University of Chicago Press, Chicago, USA.
- FEMA – FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (2021). *Resilience Analysis and Planning Tool - User Guide*. Washington, D.C.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010a). *Descrição das variáveis da amostra do Censo Demográfico 2010*. Rio de Janeiro.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2016). *Grade Estatística*. Rio de Janeiro.
- JONKMAN, S. N. (2007). *Loss of life estimation in flood risk assessment; theory and applications*. 360f. Tese. Universidade de Tecnologia de Delft. Holanda.

- LARA, P. G. D.; LOHN, J. D. L (2019). “*Em busca de um Plano de Emergência Efetivo*”. In: XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Foz do Iguaçu, Paraná.
- LUMBROSO, D.; DAVISON, M.; BODY, R.; PETKOVSEK, G. (2021). “*Modelling the Brumadinho tailings dam failure, the subsequent loss of life and how it could have been reduced*”. Natural Hazards and Earth System Sciences 21, pp. 21 – 37.
- MATOS, C. S.; ELEUTÉRIO, J. C. (2019). “*Análise de Perdas de Vidas Associadas à Ruptura Hipotética da Barragem de Fundão*”. In: XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Foz do Iguaçu, Paraná.
- MCCLELLAND, D. M.; BOWLES, D. S. (2002). *Estimating Life Loss for Dam Safety Risk Assessment: A Review and New Approach*. Institute for Water Resources Report, 02R-3. U.S. Army Corps of Engineers. Alexandria, Virgínia, USA.
- MILETI, D. S.; SORENSEN. J. H. (2017a). *First Alert and/or Warning Issuance Time Estimation for Dam Breaches, Controlled Dam Releases, and Levee Breaches or Overtopping*. U.S. Army Corps of Engineers Risk Management Center, Davis, CA.
- MILETI, D. S.; SORENSEN. J. H. (2017b). *First Alert or Warning Diffusion Time Estimation for Dam Breaches, Controlled Dam Releases and Levee Breaches or Overtopping*. U.S. Army Corps of Engineers Risk Management Center, Davis, CA.
- MILETI, D. S.; SORENSEN. J. H. (2017c). *Protective Action Initiation Time Estimation for Dam Breaches, Controlled Dam Releases, and Levee Breaches or Overtopping*. U.S. Army Corps of Engineers Risk Management Center, Davis, CA.
- RESCDAM – Rescue Actions Based on Dam-Break Flood Analysis. (2000). “*The use of physical models in dam break flood analysis*”. Final Report. Helsinki University of Technology, Helsinki, Finland.
- SILVA, A. F. R. (2020). *Análise da Aplicabilidade de Modelos de Estimativa de Perdas de Vidas para Inundações Provenientes de Rupturas de Barragens de Rejeitos*. 180f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) — UFMG.
- SILVA, A. F. R.; ELEUTÉRIO, J. C; NASCIMENTO, N. O.; PALMIER, L. R. (2020). “*Análise de exposição da população do vale a jusante da barragem da Lagoa da Pampulha a inundações – Belo Horizonte/MG*”. In: Encontro Nacional de Desastres, 2. ABRH.
- STF – SUPREMO TRIBUNAL FEDERAL (2021). Ação Cível Originária 3508. Brasília. DF. Disponível em: <<https://portal.stf.jus.br/processos/detalhe.asp?incidente=6163437>>. Acesso em: 05/06/2021.
- USACE – United States Army Corps of Engineers. Engineering (1985). “*Business Depth Damage Analysis Procedure*”. Institute for Water Resources. Research Report 85-R-5. Alexandria, Virginia.
- USACE – United States Army Corps of Engineers (2020). *HEC-LifeSim: Life Loss Estimation - Technical Reference Manual*. CPD-97a. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. Davis, California, USA. 236 p.
- USBR – United States Bureau of Reclamation (2015). *RCEM – Reclamation Consequence Estimating Methodology – Interim Guidelines for Estimating Life Loss for Dam Safety Risk Analysis*. Denver, Colorado.