



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA-UFBA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SEGURANÇA DE
BARRAGENS: ASPECTOS TÉCNICOS E LEGAIS**

KÁTIA NÚBIA CHAVES SANTANA

**SIMULAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DA ONDA DE CHEIA
CAUSADA PELO ROMPIMENTO HIPOTÉTICO DA
BARRAGEM DO RIO DO COBRE E DELIMITAÇÃO DA
ÁREA DE INUNDAÇÃO À JUSANTE, SALVADOR - BA**

Salvador
2019

KÁTIA NÚBIA CHAVES SANTANA

**SIMULAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DA ONDA DE CHEIA
CAUSADA PELO ROMPIMENTO HIPOTÉTICO DA
BARRAGEM DO RIO DO COBRE E DELIMITAÇÃO DA
ÁREA DE INUNDAÇÃO À JUSANTE, SALVADOR - BA**

Projeto de Pesquisa apresentado ao Curso de Especialização em Segurança de Barragens: Aspectos Técnicos e Legais, Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Especialista em Segurança de Barragens.

Orientadora: Professor Dra Yvonilde Dantas Pinto Medeiros

Co-Orientadora: Cássia Juliana Fernandes Torres

Salvador
2019


KÁTIA NÚBIA CHAVES SANTANA


**SIMULAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DA ONDA DE CHEIA
CAUSADA PELO ROMPIMENTO HIPOTÉTICO DA
BARRAGEM DO RIO DO COBRE E DELIMITAÇÃO DA
ÁREA DE INUNDAÇÃO À JUSANTE, SALVADOR - BA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO APRESENTADO AO CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SEGURANÇA DE BARRAGENS: ASPECTOS TÉCNICOS E LEGAIS, UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA, COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE ESPECIALISTA EM SEGURANÇA DE BARRAGENS

APROVADA EM DE DE 201 .

BANCA EXAMINADORA:

PROFA. DRA. YVONILDE DANTAS PINTO
MEDEIROS _____
DOUTORADO EM HIDROLOGIA. UNIVERSITY OF NEWCASTLE UPON
TYNE, INGLATERRA.
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA -UFBA 

PROF. DR. CARLOS HENRIQUE
MEDEIROS _____ 
DOUTORADO EM GEOTECHNICAL ENGINEERING. UNIVERSITY OF
NEWCASTLE UPON TYNE, INGLATERRA.

RESUMO

O presente artigo tem como objetivo analisar o impacto causado nas imediações do canal à jusante de reservatório considerando o rompimento hipotético da barragem do Cobre, Salvador, Bahia, através da aplicação do modelo HEC-RAS. Para tanto, a metodologia foi dividida em três etapas: Construção do hidrograma de ruptura, Levantamento dos dados necessários para a modelagem matemática e propagação da onda de cheia à jusante do reservatório através de modelo hidrodinâmico unidimensional. A análise demonstrou que a ruptura hipotética da Barragem do Cobre ocasionou na inundação de regiões com alto grau de urbanização. Na elaboração do Plano de Ações Emergenciais essa área deve ser considerada e medidas de evacuação precisam ser discutida junto à comunidade para mitigar perdas humanas numa possível ruptura. Ressalta-se que este estudo possui incertezas as quais também deverão ser levadas em consideração.

Palavras-chave: Ruptura de barragem; Mapa de inundação; Barragem do Cobre

ABSTRACT

This article aims to analyze the impact caused in the channel downstream of reservoir considering the hypothetical rupture of the Cobre's dam, Salvador, Bahia, through the application of the HEC-RAS model. Therefore, the methodology was divided into three stages: Construction of break hydrograph, Survey data necessary for mathematical modeling and propagation of the flood wave downstream from the reservoir through hydrodynamic one-dimensional model. The analysis showed that the hypothetical dambreak of the Cobre's Dam caused the flooding of regions with a high degree of urbanization. In the preparation of the Emergency Action Plan this area should be considered and evacuation measures need to be discussed with the community to mitigate human losses in a possible rupture. It should be emphasized that this study has uncertainties which should also be taken into account.

Keywords: Dam Break; Flooding mapping; Cobre's Dam

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vista aérea da Barragem do Cobre	18
Figura 2 – Imagens de Satélite da área a jusante da barragem do Cobre	19
Figura 3 – Hidrograma de ruptura com decaimento parabólico para tempo de pico de 0,29 horas	22
Figura 4 – Modelo Digital de Terreno da área de estudo	23
Figura 5 – Seção imediatamente a jusante da Barragem do Cobre	24
Figura 6 – Primeira Seção a jusante da Barragem.....	25
Figura 7 – Modelo Digital de Terreno da área de estudo sem (a) e com (b) o resultado da mancha.....	26
Figura 8 – Mapa de inundação da área de estudo com destaque para os pontos amarelos representando residências	27
Figura 9 – Seções com os parâmetros hidráulicos identificados no Quadro 6.....	29

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Vazões de pico de acordo com a literatura	13
Quadro 2 - Diferentes equações empíricas para determinação do tempo de ruptura	14
Quadro 3 – Características da Barragem do Cobre – Salvador, BA.....	20
Quadro 4 – Vazões de Pico e tempo de ruptura da Barragem do Cobre – Salvador, BA	20
Quadro 5 – Resultados da simulação de ruptura da Barragem do Cobre – Salvador, BA	25
Quadro 6 – Resultados por seção da simulação de ruptura da Barragem do Cobre – Salvador, BA.....	28

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	5
1.1	Objetivo Geral.....	7
1.2	Objetivos específicos	8
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	9
2.1	Segurança de barragem	9
2.2	Causas de ruptura em barragens	10
2.3	Etapas para construção de um estudo de ruptura de barragem e do mapa de inundação.....	11
3	METODOLOGIA	13
3.1	Identificação do hidrograma da onda de cheia	13
3.2	Levantamento dos dados necessários para a modelagem matemática.....	15
3.3	Simulação da Propagação da onda de cheia a jusante da Barragem.....	16
3.4	Construção do Mapa de inundação E análise DO IMPACTO	16
4	ESTUDO DE CASO: BARRAGEM DO COBRE	18
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
5.1	Definição do hidrograma de ruptura	20
5.2	Análise dos dados utilizados na modelagem matemática	22
5.3	Simulação da propagação da onda de cheia à jusante da barragem.....	24
5.4	Construção do mapa de inundação e análise do impacto.....	25
6	CONCLUSÃO	2
7	REFERÊNCIAS	3

1 INTRODUÇÃO

A Política Nacional de Segurança de Barragem (PNSB) publicada em 2010 exige que os barramentos sejam analisados com maior raio de abrangência, sendo observada a estrutura física da barragem e os impactos que elas podem causar num possível rompimento. Em função da categoria de risco e do dano associado exige-se a elaboração de um Plano de Ações Emergenciais (PAE) como conteúdo anexo ao Plano de Segurança de Barragem, onde é destacada a área que será diretamente afetada pelos impactos.

Os impactos podem atingir tanto o meio ambiente quanto a população, socioeconomicamente. Segundo CONAMA (1986) impacto ambiental é *“qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: I - a saúde, a segurança e o bem-estar da população; II - as atividades sociais e econômicas; III - a biota; IV - as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; V - a qualidade dos recursos ambientais”*.

As barragens exercem um impacto positivo no bem estar dos indivíduos, por permitir a geração de energia, propiciar o desenvolvimento regional, o abastecimento de água, favorecer a agricultura, a navegação e o lazer. Impactos negativos também são observados pois as barragens promovem a inundação de áreas urbanas, terras férteis e/ou de grande diversidade biológica, intensificam fluxos migratórios, impedem a migração de peixes, alteram a conformação do rio a jusante dos estuários, além de afetar a fauna terrestre e possibilitar o aparecimento de parasitas e transmissores de doenças (ANA,2016).

Apesar dos distintos impactos, inúmeras barragens já foram construídas e outras estão sendo projetadas e implantadas. Atualmente, cabe a análise destas infraestruturas mediante a experiência que fora acumulada com o tempo através dos diversos acidentes ocorridos. A preocupação deve estar voltada para a proteção das áreas diretamente afetadas pela barragem, principalmente se a mesma possuir alto potencial de perda humana.

De acordo com ANA e FPTI (2011) as barragens exercem papel importante nas estratégias de gestão dos recursos hídricos por regularizar as vazões de uma bacia hidrográfica e reduzir danos provocados por enchentes e inundações. A redução do fluxo d'água, proporcionada pela barragem, ocasiona menor área molhada no vale de jusante.

O aumento de superfície habitável causa avanço da ocupação urbana e a comunidade começa a estabelecer moradias na região sem nenhum tipo de fiscalização ou impedimentos. Por estarem em cotas inferiores ao barramento, essas áreas apresentam elevada vulnerabilidade em casos de acidentes em sua estrutura.

Quanto maior for a vulnerabilidade na exposição de pessoas e bens a inundações, maior será o risco associado. Os riscos são considerados por Apel *et al.* (2008) como o perigo em função dos aspectos físicos e estatísticos, tais como o período de retorno da inundação, a extensão e a profundidade da inundação. O crescimento do risco amplifica a adoção de medidas preventivas, de controle e de mitigação na gestão da barragem

através da concepção de ações de caráter normativo, conforme a Política Nacional de Segurança de Barragem (PNSB).

A gestão do risco está relacionada ao dano potencial associado à barragem que segundo a PNSB conceitua-se como um “dano que pode ocorrer devido ao rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mau funcionamento”. As ações mitigadoras para garantir a segurança da barragem devem constar nos relatórios de inspeção do barramento, um dos conteúdos mínimos requisitados pelo Plano de Segurança de Barragem.

A depender da categoria de risco identificada, estabelecida pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), o órgão fiscalizador poderá determinar a elaboração de Plano de Ação de Emergência (PAE). Neste PAE deverão conter as medidas a serem tomadas em situação de emergência, bem como a identificação da área afetada diretamente pela sua ruptura, de forma que os procedimentos de emergência sejam executados de maneira direcionada, rápida e eficaz.

A área de inundação dessa ruptura representa a exposição a jusante ao perigo criado por uma barragem no evento de falha ou operação incorreta que leva à liberação descontrolada de água represada (Froehlich *et al.*, 2017). Um mapa de inundação identifica a amplitude da propagação espacial da onda de cheia provocada por sua ruptura.

A análise desse acidente e as inundações resultantes são essenciais para identificar e reduzir o potencial de perda de vida e danos na planície de inundação a jusante (PIERCE *et al.*, 2010). É evidente que a inundação não pode ser evitada, mas adotando métodos adequados de evacuação, as perdas podem ser minimizadas (KUMAR *et al.*, 2017).

O estudo de ruptura pode ser realizado de forma simples ou através do auxílio de modelagem hidráulica e hidrológica. O modelo utiliza dados tanto da estrutura do barramento quanto da bacia hidrográfica em que o mesmo se insere, mediante características espaciais e temporais, mapeando a planície de inundação e fornecendo resultados utilizados na preparação de apoio ao sistema de decisão (KHATTAK *et al.*, 2016). Segundo Apel *et al.* (2008) a complexidade dos modelos aplicados varia de métodos simples de interpolação a modelos sofisticados e detalhados espacialmente.

A partir da identificação de hidrogramas de ruptura, os mesmos podem ser aplicados na modelagem do estudo de ruptura e sucessivamente as áreas inundadas serão delimitadas. Também são detectadas as velocidades e profundidades de fluxo de forma a estimar o potencial do dano causado por este fenômeno no barramento.

Apesar da possibilidade de utilização dos softwares matemáticos nos estudos de ruptura de barragens, como ferramenta de auxílio, Molinari *et al.* (2019) destacam a necessidade de melhorar a qualidade dos dados geométricos, hidráulicos e hidrológicos para realizar a validação dos modelos e de realizar troca de informações entre os especialistas de forma a contemplar diferentes contextos.

Os casos de ruptura observados tanto no país quanto em todo o mundo refletem na necessidade em atualizar e monitorar todas as barragens existentes no Brasil. Além disso, os acidentes sucedidos na Europa e na América do Norte servem como discussão

em vários segmentos da sociedade técnica e civil. Para Yavaşoğlu *et al.* (2018), a maioria das falhas poderia ter sido evitada caso houvesse o hábito de inspeção, monitoramento e análise periódicos e se as medidas corretivas apropriadas tivessem sido tomadas rapidamente.

Muitas barragens do estado da Bahia ainda estão em processo de andamento nos estudos referentes à área de inundação gerada em caso de acidente. Segundo ANA (2018), “*com base nos critérios gerais estabelecidos pela Resolução CNRH nº 143/2012, o INEMA já realizou a classificação de 328 barragens, tendo sido informada aos empreendedores a classificação de suas barragens através de notificação de comunicação, onde cada barragem tem o seu documento de classificação emitido pelo órgão fiscalizador.*”

Na Bahia, a região mais densa é a capital com 3.859,44 hab/km² (IBGE,2010). Apesar da elevada urbanização neste território, algumas barragens foram construídas no século XIX com o objetivo de abastecer o município e outras cidades próximas. Estas eram implantadas em locais inabitados, distantes do centro e em bacias hidrográficas capazes de suprir a demanda populacional.

Atualmente, em virtude do constante crescimento urbano em Salvador, por exemplo, houve não só o aumento da demanda para o abastecimento como redução da oferta de água em função da deterioração da qualidade de água de alguns mananciais. Os mananciais mais afetados são aqueles existentes no perímetro urbano. Destacam-se as barragens do Cobre, Cachoeirinha, Ipitanga I, Ipitanga II e Pituaçu, sendo que hoje as barragens do Cobre (inoperante desde 2005) e de Pituaçu (desativada em 2002) são utilizadas unicamente para recreação. A barragem de Pituaçu é zoneada e de terra com 12 metros de altura e capacidade volumétrica de 3 hm³, enquanto que a do Cobre é do tipo gravidade de alvenaria com 19 metros de altura e capacidade para 2,34 hm³ (INEMA, 2018).

Diante do exposto, o presente estudo propõe analisar a abrangência da propagação da onda de cheia da Barragem do Cobre que é 1,58 vezes mais alta que a barragem de Pituaçu e possui seu vale de jusante altamente povoado, o que hipoteticamente ocasionaria maiores perdas humanas. Essa barragem foi implantada no município de Salvador no ano de 1932 com o objetivo de abastecer a essa cidade e região metropolitana. Atualmente ela encontra-se inoperante e está sendo utilizada apenas para recreação em virtude da deterioração da qualidade da água para abastecimento humano.

Logo, esta pesquisa visa responder à seguinte questão:

Qual a abrangência da propagação da onda de cheia, através do fenômeno de galgamento, e seu efeito na comunidade instalada no vale de jusante da barragem do Cobre, localizada no município de Salvador?

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a propagação da onda de cheia causada pelo rompimento hipotético da Barragem do rio do Cobre através da delimitação da área de inundação, situada na cidade de Salvador-BA.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar o hidrograma da onda de cheia em função do fenômeno de galgamento;
2. Simular a onda de cheia com o auxílio do software HEC-RAS 4.1;
3. Construir o mapa de inundação gerado pela propagação da onda de cheia da barragem do Cobre;
4. Analisar a abrangência do impacto da propagação da onda de cheia no vale de jusante da barragem.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SEGURANÇA DE BARRAGEM

Barragens são quaisquer “estruturas em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas” (BRASIL,2010). Sua implantação acomete em impactos positivos e negativos, tanto sociais quanto ambientais, desde a etapa de construção.

A Política Nacional de Segurança de Barragem (PNSB), através da Lei Federal nº 12.334/2010 é aplicada a barragens de acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais. As barragens contempladas por esta Política Nacional devem apresentar pelo menos uma das seguintes características, conforme o art 1: altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15m (quinze metros); capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m³ (três milhões de metros cúbicos); reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis; ou estar classificada como categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas (BRASIL,2010).

De acordo com o conceito apresentado pela PNSB, a segurança da barragem representa uma condição que vise a manter a sua integridade estrutural e operacional e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente. Para isto alguns instrumentos são estabelecidos tais como o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB); o sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado; o Plano de Segurança de Barragem; o Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente (Sinima); o Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental; Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras ou utilizadoras de Recursos Ambientais; e o Relatório de Segurança de Barragens.

A classificação das barragens influencia no rigor das medidas adotadas para a segurança do empreendimento, a qual influi diretamente na sustentabilidade e no alcance de potenciais efeitos sociais e ambientais. Os critérios aplicados são determinados pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) através da Resolução nº143/2012. Esta resolução tem o objetivo de estabelecer critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, em atendimento ao art. 7º da Lei nº 12.334, de 2010 (BRASIL,2012).

As informações técnicas e operacionais das barragens devem estar contidas no Plano de Segurança de Barragem (PSB) que periodicamente precisa ser atualizado com as informações do barramento e das condições do seu entorno. Nele além de ser descrita a situação em que a barragem se encontra, também são apresentadas ações a serem adotadas pelo empreendedor para a manutenção da segurança da barragem.

Em função da categoria de risco e do dano potencial associado à barragem o órgão fiscalizador poderá exigir o Plano de Ações Emergenciais (PAE) como conteúdo anexo ao PSB. O PAE tem o objetivo de estabelecer as ações a serem executadas pelo empreendedor da barragem em caso de situação de emergência, bem como identificar os

agentes a serem notificados dessa ocorrência, devendo contemplar, pelo menos: identificação e análise das possíveis situações de emergência; procedimentos para identificação e notificação de mau funcionamento ou de condições potenciais de ruptura da barragem; procedimentos preventivos e corretivos a serem adotados em situações de emergência, com indicação do responsável pela ação; e estratégia e meio de divulgação e alerta para as comunidades potencialmente afetadas em situação de emergência.

Mediante o exposto, verifica-se que a PNSB estabelece algumas premissas para garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidente e suas consequências, dentre outros objetivos. Apesar de todos os documentos e detalhamentos das informações identificados pela legislação como condições mínimas para a garantia da segurança do barramento, alguns acidentes ainda ocorrem nas barragens brasileiras.

2.2 CAUSAS DE RUPTURA EM BARRAGENS

O crescimento populacional e a conseqüente demanda por desenvolvimento econômico a partir do sec XIX ocasionou no aumento do número de barragens, sendo elas dos tipos de terra, arcos múltiplos, concreto, enrocamento e alvenaria de pedra (VEROL, 2010). Associadamente, os acidentes e incidentes resultantes de fenômenos naturais ou antrópicos também cresceram, gerando perdas ambientais e humanas e prejuízos econômicos no mundo todo.

Na Europa, ANA e FPTI (2011) mencionaram acidentes nas barragens de Malpasset, França, 1959; Vajont, Itália, 1963; Baldwin Hills e Teton, Estados Unidos, 1951 e 1976). Pierce *et al.* (2010) citam que entre os anos 1972 e 1977 ocorreram acidentes nas seguintes barragens nos Estados Unidos: Buffalo Creek, West Virginia; Canyon Lake, Dakota do Sul; Teton, Idaho; e Kelly Barnes, Georgia. No Brasil, Veról (2010) e ANA (2016) citam os acidentes ocorridos nas barragens da Pampulha -MG (1954), de Orós – CE (1960), de Euclides da Cunha e Sales de Oliveira (1977), de Camará -PB (2004), de Apertadinho -RO (2008), de Algodões I – PI (2009), do Fundão (2015), Fazenda Guavirova – PR (2015), UHE Risoleta Neves-MG (2015), Mariana – MG (2015), Botuporã - BA(2016), entre outros.

O tipo de ruptura varia de acordo com as causas materiais e/ou naturais e causas resultantes da ação humana (MASCARENHAS, 1990). Os materiais utilizados na construção da barragem podem facilitar a formação de galgamento, piping, deslizamento das fundações ou do enrocamento, terremotos, entre outros, enquanto que a ação humana predispõe a barragem a problemas como falha no projeto e/ou construção, operação inadequada do reservatório, ações de guerra, entre outros.

De acordo com Veltrop (1991) *apud* Verol (2010), os tipos de problemas mais comuns causadores de ruptura de barragens são galgamento, *piping* no aterro e erosão do leito. O galgamento está atrelado à capacidade do vertedor ou o mal funcionamento de um dispositivo de descarga de água, onde há a passagem da água por cima do barramento. O *piping* é um fenômeno originado pela erosão interna da barragem ou de suas fundações pela percolação de água que inicia-se na extremidade de jusante da barragem. Já a erosão do leito acontece mediante a implantação de materiais constituintes da barragem com baixa resistência.

2.3 ETAPAS PARA CONSTRUÇÃO DE UM ESTUDO DE RUPTURA DE BARRAGEM E DO MAPA DE INUNDAÇÃO

ANA (2013) adotou alguns critérios e cenários de modelagem da cheia de ruptura, sendo eles:

- Identificação da brecha de ruptura, através da configuração geométrica, das dimensões (largura) e o tempo de ruptura;
- Identificação de cenários hidráulicos através da elaboração de hidrogramas de ruptura;
- Identificação da extensão do cálculo de propagação da onda de cheia, podendo limitar-se à seção de confluência com outro rio de maior dimensão ou um reservatório a jusante;
- Elaboração do mapa de inundação a jusante, contendo as seguintes informações: identificação do cenário que lhes corresponde; limites das zonas inundáveis; limites administrativos das áreas atingidas (estado, município, localidade); vias de comunicação inundadas e identificação das obras de arte atingidas; infraestruturas e instalações importantes ou existência de instalações de produção ou de armazenagem de substâncias perigosas;
- Caracterização da Zona de Auto Salvamento (ZAS) através do mapeamento das zonas inundáveis e do conhecimento da altura e velocidade de propagação da onda em cada trecho e do seu tempo de chegada. No ZAS devem-se apresentar as povoações afetadas e estimativa do número de pessoas atingidas; levantamento das infraestruturas afetadas (vias de comunicação, infraestruturas e instalações importantes ou existência de instalações de produção ou de armazenagem de substâncias perigosas); infraestruturas coletivas afetadas; infraestruturas coletivas afetadas;

Estes fundamentos apresentados pela Agência Nacional de Águas é similar ao que fora adotado por ICOLD no ano de 1998. O desenvolvimento, aprimoramento e utilização de softwares hidrodinâmicos são importantes tanto na confiabilidade do prognóstico quanto na adoção de medidas de prevenção e correção de acidentes na área de jusante do barramento.

Cada software possui suas limitações e recursos, necessitando de informações importantes que servirão como dados de entrada e de contorno nas análises, o que, do contrário, torna os resultados imprecisos.

Dentre os modelos hidrodinâmicos direcionados para o estudo de ruptura de barragem tem-se FLO-2D, WMS, DAMBRK MODEL, FLDWAV, SMPDBK, HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis), DHI-MIKE21, DHI-MIKE11, entre outros (PILOTTI *et al.*, 2014; MOHARRAMPOUR *et al.*, 2011; WAHL, 2010, KUMAR *et al.*, 2017; FERLA *et al.*, 2017; SONINBAYAR e AUDRA, 2018; TSCHIEDEL e PAIVA, 2018). Todos estes modelos possuem capacidades semelhantes em construir mapas de inundação, entretanto, o mais comumente escolhido e utilizado é o HEC-RAS por ser de livre acesso e por necessitar de poucos dados de entrada.

De acordo com Kumar *et al.* (2017) alguns estudos de ruptura foram realizados com o auxílio do modelo HEC-RAS por Hicks & Peacock (2005), Yang *et al.* (2006), Yochum *et al.* (2008), Salajeghah *et al.* (2009), Xiong (2011), Timbadiya *et al.* (2012), Qi &

Altinakar (2012), Yerramilli (2012), ShahiriParsa *et al.* (2013), Asnaashari *et al.* (2014), Khattak *et al.* (2016) e Moya Quiroga *et al.* (2016). Estes autores, citados por Kumar *et al.* (2017), chegaram à conclusão de que este modelo: apresenta um bom desempenho sem a necessidade de calibração de Manning o que economiza o tempo do usuário, apesar de ser aconselhável realizar a investigação da sensibilidade deste parâmetro; fornece simulações atualizadas com melhor rotina computacional; suporta a importação e exportação de dados da plataforma GIS o que permite visualizar o alcance do rio e os dados das seções transversal; pode apresentar erro aleatório na elevação da superfície da água projetado do modelo em virtude da resolução espacial do modelo digital de terreno; possui layout e apresentação dos resultados de forma simples e amigável, não necessitando de muita experiência do usuário no manuseio de softwares; e possui sistema versátil e confiável para estimar vários danos causados pelas inundações.

Procedimentos mais simples também são realizados para o estudo de ruptura de barragens quando seu vale de jusante não apresenta risco de perdas de vidas humanas e danos a propriedades. Dessa forma, o grau de detalhamento e do estudo está diretamente relacionado com a classificação da barragem e do que este evento causa a jusante. De acordo com Froehlich *et al.* (2016), barragens de alto potencial de risco são atribuídas àquelas que em uma situação catastrófica possuiria fatalidades e/ou grandes perdas econômicas ou ambientais. Barragem de baixo potencial de risco são aquelas onde a falha não colocaria em risco vidas e causaria apenas pequenas quantias de danos limitados principalmente à propriedade do proprietário da barragem.

3 METODOLOGIA

A metodologia do presente estudo consiste em quatro etapas:

1. Identificação do hidrograma da onda de cheia em função do fenômeno de galgamento;
2. Levantamento dos dados necessários para a modelagem matemática;
3. Simulação da onda de cheia com o auxílio do software HEC-RAS 4.1;
4. Construção do mapa de inundação gerado pela propagação da onda de cheia da barragem do Cobre com posterior análise da abrangência do impacto da propagação da onda de cheia no vale de jusante da barragem.

As informações necessárias para condução do estudo consistem em imagens de satélite obtidas através da missão SRTM e do Google Earth, dados hidrológicos e hidráulicos referentes a estrutura da barragem disponibilizadas pelo acervo técnico e público do INEMA – Instituto Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado da Bahia.

3.1 IDENTIFICAÇÃO DO HIDROGRAMA DA ONDA DE CHEIA

Para a construção do hidrograma de ruptura é necessário identificar as características hidráulicas da barragem, os parâmetros da brecha e o tempo de ruptura. A vazão de pico foi definida de acordo com equações empíricas identificadas por alguns autores na literatura, conforme Quadro 1. Essas equações utilizam informações do barramento referentes à comprimento, altura, volume máximo armazenado e área do reservatório. A escolha da vazão de pico a ser utilizada na construção do hidrograma está de acordo com as características das equações e sua adequação à área de estudo.

Quadro 1 – Vazões de pico de acordo com a literatura

Autor	Vazão de pico (m³/s)	Características
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	$Q_p = 7,683H_{hid}^{1,909}$ (Eq.5)	Fórmula baseada na análise de 19 diferentes casos de ruptura de natureza diversa
Saint-Venant (-) apud U.S. Army Corps of Enginners (1997)	$Q_p = \frac{8}{27} B_d \sqrt{gY_{médio}^3}$ (Eq.6)	Fórmula desenvolvida por Saint-Venant para o caso de remoção instantânea e total do barramento
Schoklistch (1917) apud ICOLD (1998)	$Q_p = \frac{8}{27} \left(\frac{B_d}{B_p}\right)^{1/2} B_b \sqrt{gY_{médio}^3}$ (Eq.7)	Fórmula considerando a situação em que a ruptura ocorre em parte da crista de uma barragem
Hagen (1982)	$Q_p = 1,205(VH_{hid})^{0,48}$ (Eq.8)	Fórmula baseada em observações de valores relativos a casos já ocorridos de ruptura
USBR (1982) apud USBR (1987)	$Q_p = 19H_{hid}^{1,85}$ (Eq.9)	Equação baseada em dados coletados de vazões de pico históricas e da profundidade da lâmina de água no reservatório no momento da ruptura. Foi desenvolvida considerando em média 21 casos de falhas em barragens de concreto em arco e por gravidade.

Autor	Vazão de pico (m³/s)	Características
Vertedor de Soleira Espessa - Singh (1996)	$Q_p = 1,7B_b H_b^{\frac{3}{2}}$ (Eq.10)	De acordo com Singh (1996), o escoamento que passa pela brecha pode ser assumido como análogo ao escoamento que passa por um vertedouro retangular de soleira espessa.
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	$Q_p = 1,7B_b \left[\frac{1,94 \frac{A_s}{B_b}}{T_p + \left(\frac{1,94 A_s}{B_b \sqrt{H_{hid}}} \right)} \right]^3$ (Eq.11)	Equação considerando a formação de uma brecha retangular, desenvolvendo-se em um intervalo de tempo (t)
Soil Conservation Service (1981)	$Q_p = 16,6 H_{hid}^{1,85}$ (Eq.12)	Equação considerando 13 casos históricos de ruptura de barragem utilizados por Kirkpatrick (1977)
Kirkpatrick (1977)	$Q_p = 1,268(H_{hid} + 0,3)^{2,5}$ (Eq.13)	Equação considerando 13 casos de ruptura histórico de barragem de terra e 6 casos hipotéticos
Froehlich (1995)	$Q_p = 0,607 K_o V_{hid}^{0,295} H_{hid}^{1,24}$ (Eq.14)	Com base em 22 casos históricos de ruptura em barragens de terra Ko = 1,4 para galgamento e 1,0 para outros casos. Ajuste de 0,934
Institution Of Civil Engineers (1996)	$Q_p = 1,3 H_{hid}^{2,5}$ (Eq.15)	Expressão em função apenas da altura da barragem
Evans (1986)	$Q_p = 0,72 V_{hid}^{0,53}$ (Eq.16)	Equação considerando falhas naturais em barragens provocadas pelo homem
Costa (1985)	$Q_p = 0,763(V_{hid} H_{hid})^{0,42}$ (Eq.17)	_____

Fonte: Brasil (2005a); Brasil (2005b) Lauriano (2009); Viseu (2006); Ferreira & Andrzejewski (2015); Pierce *et al.* (2010); Walh (2004)

Onde: Q_p - descarga máxima defluente da barragem em ruptura (m³/s); V - volume do reservatório para o NA máximo (m³); A_s - área do reservatório para N.A. Máximo (m²); B_b - largura final da brecha (m); H_b - altura final da brecha (m); Y_{medio} - profundidade média no reservatório no instante da ruptura (m); B_d - largura da barragem (m); g - aceleração da gravidade (9,8m/s²); T_p - tempo para desenvolvimento da brecha (s); V_{hid} - volume de água descarregado durante a ruptura, ou seja, volume de água contido entre a cota do nível de água no reservatório no instante inicial da ruptura e a cota final da soleira inferior da brecha (m³); H_{hid} - carga hidráulica máxima sobre a base da brecha (m)

O tempo de pico admitido neste estudo considera as equações empíricas apresentadas no Quadro 2. A escolha deste tempo está condizente com as características da área de estudo.

Quadro 2 - Diferentes equações empíricas para determinação do tempo de ruptura

Autor	Tempo de pico	Características
Froehlich (1987)	$T_{rup} = 0,007 \left(\frac{V}{H_b^2} \right)^{0,5}$ (Eq.18)	Equação desenvolvida com base nas características de 43 brechas que se desenvolveram em barragens de terra
Froehlich (1995)	$T_{rup} = 0,00254 \left(\frac{V_{hid}^{0,53}}{H_b^{0,5}} \right)$ (Eq.19)	Equação tendo por base uma amostra maior de rupturas históricas
Von Thun & Gillette (1990)	$T_{rup} = 0,02 H_{hid} + 0,25$ (Eq.20)	Equação empírica válida para aterros com materiais resistentes à erosão
Von Thun & Gillette (1990)	$T_{rup} = 0,015 H_{hid}$ (Eq.21)	Equação empírica válida para aterros com materiais facilmente erodidos

Autor	Tempo de pico	Características
Hartford & Kartha (1995)	$T_{rup} = \frac{1}{30} H_{Barragem}$ (Eq.22)	Para barragens com menos de 60 metros de altura, T_{rup} será inferior a duas horas.

Fonte: Viseu (2006)

Com base na vazão de pico e no tempo de ruptura, foi elaborado o hidrograma de ruptura da barragem, do tipo parabólico e construído segundo WALTHER *et al.* (2000) *apud* Lauriano (2009), calculado pela equação 01.

$$Q_t = Q_p \left[\left[\frac{t}{T_p} \right] e^{\left(1 - \frac{t}{T_p}\right)} \right]^K$$

Equação 01

Esse hidrograma representa à onda de cheia oriunda da ruptura parcial da estrutura da barragem em virtude do fenômeno de galgamento (*overtopping*) onde a vazão de ruptura a ser considerada é superior a descarga máxima de projeto do vertedouro. O fenômeno escolhido foi de galgamento em função do tipo de estrutura que a barragem é formada. Neste caso, considera-se a influência da precipitação, e o nível inicial da simulação corresponde ao nível da máxima cheia (VISEU, 2006). Além disso, a vazão de pico do hidrograma de ruptura é igual a vazão de pico calculada pelas equações empíricas somada com a vazão de projeto do vertedor da barragem.

3.2 LEVANTAMENTO DOS DADOS NECESSÁRIOS PARA A MODELAGEM MATEMÁTICA

O estudo da ruptura de barragens pode ser auxiliado pela utilização de modelos matemáticos. Estas modelagens necessitam que a área de estudo seja inserida no software, através de uma visão simplificada da realidade, de forma que os algoritmos a compreendam e as formulações implícitas sejam realizadas. Dessa forma, usualmente os modelos hidrodinâmicos demandam de informações referentes à geometria da área de estudo, como entrada, e de dados de contorno.

Como dados de entrada é inserida a geometria que é equivalente ao perfil do terreno, à superfície topográfica do local do estudo, georreferenciada. Nesta pesquisa foram utilizadas as imagens de satélite da SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*, com resolução espacial de 30 metros, sendo interpolado a cada 5 metros das linhas mestras da curva de nível. Para a construção da geometria, foi utilizado o auxílio do software Autocad Civil 3D. Desta geometria adquire-se as seções transversais do curso hídrico, as quais informam sobre a distância e a cota de cada ponto da superfície, associando-se a um plano cartesiano perpendicular ao fluxo do rio. A partir desta informação georreferenciada, também obtiveram-se automaticamente os dados da distância entre cada seção transversal.

Os dados de contorno são responsáveis por determinar as restrições da modelagem em função de registros de comportamento do curso hídrico. Representam uma condição que o usuário fornece à área de estudo com a finalidade de obter respostas de como a região

se comportará em face de tal aplicação. Foram utilizados dados hidráulicos e hidrológicos para o estudo da ruptura hipotética da Barragem do Cobre. Também foi utilizado o hidrograma de ruptura por galgamento na seção a montante da área de estudo e a declividade do trecho na seção de jusante, sendo calculada em função da diferença de cota e comprimento entre os pontos extremos do canal.

3.3 SIMULAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DA ONDA DE CHEIA A JUSANTE DA BARRAGEM

A propagação da onda de cheia a jusante da barragem foi realizada com o auxílio da modelagem hidrodinâmica. Mundialmente há diversos softwares que são utilizados para esta finalidade. Cabe ao usuário identificar qual deles tem maior compatibilidade com as informações existentes referentes ao seu estudo.

Dentre os modelos existentes (FLO-2D, WMS, DAMBRK MODEL, FLDWAV, SMPDBK, HEC-RAS, DHI-MIKE21, DHI-MIKE11, entre outros), aquele que apresenta simplificações, tanto na aquisição de dados de entrada e de contorno quanto na facilidade e simplicidade na interface gráfica e na apresentação dos resultados é o HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center – River Analysis*). Esse modelo é amplamente utilizado por ser de livre acesso e por necessitar de poucos dados de entrada.

Perante isto, nesta pesquisa, a simulação da propagação da onda de cheia foi realizada com o auxílio do modelo HEC-RAS, desenvolvido pelo centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (*US Army Corps of Engineers*, 2010). O modelo possui versões uni 1D (4.1) e bidimensionais 2D (5.0), a diferença está na geometria necessária e na inclusão da equação da onda de difusão no modelo 2D. Além disso, a resposta dos modelos bidimensionais é, de certa forma, mais completa pois abrange as dimensões verticais e horizontais na simulação.

Os modelos bidimensionais precisam de uma geometria da área de estudo mais detalhada e com pequena resolução espacial. Como neste estudo as imagens de satélite possuíam resolução de 30 metros, considerou-se mais pertinente a utilização do modelo na versão mais simplificada, o qual também atenderia ao objetivo desta pesquisa.

O cálculo matemático envolvido neste modelo hidrodinâmico está baseado nas equações diferenciais da conservação da massa e do balanço de movimento, via Equação de Saint Venant, para escoamento em regime permanente e não-permanente para canais com superfície livre (naturais e artificiais).

Perante isto, neste modelo foram utilizadas as informações espaciais, hidráulicas e hidrológicas levantadas previamente à sua escolha, como dados de entrada (geometria da área de estudo) e de contorno (vazão e declividade) para realizar a simulação e posterior construção do mapa de inundação.

3.4 CONSTRUÇÃO DO MAPA DE INUNDAÇÃO E ANÁLISE DO IMPACTO

A elaboração do mapa de inundação foi realizada a partir dos resultados obtidos na simulação da propagação da onda de cheia no modelo hidrodinâmico HEC-RAS. Estes resultados foram importados para o software ArcGis (versão 10.2.2) que através da sua

ferramenta de extensão HEC-Georas foi possível extrair uma imagem no formato raster com a delimitação da mancha de inundação. Para tanto, foi utilizada imagem de satélite no Datum WGS84 e as curvas de nível da área à jusante da barragem.

Esta delimitação da mancha foi projetada na imagem de satélite do google Earth e a análise da abrangência do impacto desta propagação da onda foi realizada. A identificação da quantidade de pessoas atingidas em função do fenômeno de galgamento à jusante da Barragem do Cobre foi realizada através da contagem das casas presentes dentro da delimitação da mancha.

A partir do somatório das casas observadas na imagem de satélite, foi atribuída a média de moradores em domicílios estabelecida pelo censo de 2010 para a cidade de Salvador que é de 3,10 hab/domicílio (IBGE,2010).

4 ESTUDO DE CASO: BARRAGEM DO COBRE

A barragem do Cobre foi implantada em 1932 com a finalidade de abastecimento humano e está localizada no médio curso do rio do Cobre, entre os bairros de Pirajá e Plataforma, situados no município de Salvador-Ba, conforme a Figura 1.



Figura 1 – Vista aérea da Barragem do Cobre

Fonte: Embasa (2007) *apud* Cordeiro (2009)

A barragem possui a estrutura do tipo de alvenaria de pedra, altura de 19 metros, comprimento de 141 m e largura de coroamento de 1,55m. O reservatório ocupa uma área de 2,8 km² com capacidade para reter 2.340.000 m³ de água, sendo 1.640.000 m³ de volume útil e 700.000m³ de volume morto. O vertedor foi projetado para 2,3 m³/s de vazão de pico, com largura de 22,4 metros. A condução da água foi projetada em função de uma tomada d'água com diâmetro de 400mm, galeria de 70 metros de extensão e vazão de projeto de 90 l/s, operada por duas comportas (SRH, 1996 *apud* CORDEIRO, 2009).

Os bairros de Pirajá e Plataforma encontram-se com alto grau de urbanização, havendo muitas moradias instaladas de forma irregular, especialmente, localizadas à jusante desse empreendimento. Em função do aumento das pressões urbanas e da instalação de moradias no seu entorno, a qualidade da água de seu reservatório foi comprometida e atualmente ele é utilizado apenas como ponto de recreação, sendo uma área protegida como “Parque Florestal da Represa do Cobre” (Santos *et al.*, 2018). Em virtude da redução da qualidade da água, este reservatório encontra-se inoperante e não conduz mais água para abastecimento humano da cidade de Salvador.

A área de jusante da barragem do Cobre encontra-se em crescimento populacional como pode ser observado nas imagens de satélite dos anos de 2005 e 2018 (Figura 2). Esse adensamento populacional a jusante ocorre de maneira indiscriminada e não planejada.



Figura 2 – Imagens de Satélite da área a jusante da barragem do Cobre
Fonte: Adaptado de Google Earth (2018)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo descreve os resultados obtidos nesta pesquisa e está dividido nos seguintes tópicos:

- i. Definição do hidrograma de ruptura;
- ii. Análise dos dados utilizados na modelagem matemática;
- iii. Simulação da propagação da onda de cheia à jusante da barragem; e,
- iv. Elaboração do mapa de inundação e quantificação do impacto ambiental.

5.1 DEFINIÇÃO DO HIDROGRAMA DE RUPTURA

As características hidráulicas são essenciais na definição do hidrograma de ruptura por galgamento. Com as informações apresentadas no Quadro 3 foram identificados a vazão de pico e o tempo de ruptura conforme Quadro 4.

Quadro 3 – Características da Barragem do Cobre – Salvador, BA

Característica	Variável	Unidade	Valor
Largura da barragem	Bd	m	141
Altura da barragem ¹	Hbar	m	19
Carga hidráulica	Hhid	m	19,15
Volume do reservatório	V	m ³	2.340.000
Área do reservatório	As	m ²	20.650.000
Largura final da brecha (2,75*Hbar)	Bb	m	52,25
Altura final da brecha (80% ² * Hbarragem)	Hb	m	15,2
Volume de água descarregado durante a ruptura (Vhid=V)	Vhid	m ³	2.340.000
Profundidade média do reservatório (Ymed = 1/3X Hhid)	Ymed	m	6,38
Aceleração da gravidade	g	m/s ²	9,8

Fonte: ¹ Hartford & Kartha, (1995) *apud* Viseu (2006) ; ²Morris e Galland (2000)

A partir do Quadro 3 verifica-se que a barragem possui 19 metros de altura e volume total de armazenamento de 2,3 hm³ que seria totalmente descarregado à jusante num acidente de galgamento. Analisando-se a largura final da brecha, Hartford & Kartha, (1995) *apud* Viseu (2006) e Morris e Galland (2000) propuseram que a mesma corresponderá a 2,75 vezes a altura do barramento, resultado em 15,2 metros. Essas características estruturais são importantes na verificação hidráulica do rompimento hipotético (Quadro 4).

Quadro 4 – Vazões de Pico e tempo de ruptura da Barragem do Cobre – Salvador, BA

OBTENÇÃO DAS VAZÕES DE PICO		OBTENÇÃO DO TEMPO DE RUPTURA	
Autor	Vazão (m ³ /s)	Autor	Tempo (horas)
Lou (1981)	2.153,73	Froehlich (1987)	0,70
Saint-Venant	2.109,26		

OBTENÇÃO DAS VAZÕES DE PICO		OBTENÇÃO DO TEMPO DE RUPTURA	
Autor	Vazão (m ³ /s)	Autor	Tempo (horas)
Schoklistch (1917)	1.283,99	Froehlich (1995)	0,52
Hagen (1982)	5.670,90		
USBR (1982)	4.474,72	Von Thun & Gillette (1990) - materiais resistentes à erosão	0,63
Singh (1996)	5.263,81		
Soil Conservation Service (1981)	3.909,49		
Kirkpatrick (1977)	2.115,53	Von Thun & Gillette (1990) – materiais facilmente erodidos	0,29
Froehlich (1995)	2.501,06		
Institution Of Civil Engineers (1996)	2.086,24		
Evans (1986)	1.781,34	Hartford & Kartha (1995)	0,63
Costa (1985)	1.247,69		
Wetmore e Fread (1981)	782.290,55		

A partir dos valores encontrados no Quadro 4, observa-se que a vazão de pico varia de 1.247,69 m³/s a 782.290,55 m³/s, constatando grande discrepância entre as equações. Com relação ao tempo de ruptura a diferença foi menor variando de 0,29 a 0,70 horas.

Para este estudo, foi considerada a vazão definida por Froehlich (1995), 2.501,06 m³/s, a qual obteve suas variáveis estudadas para o fenômeno de ruptura por galgamento. Após estudos de algumas literaturas, Basheer *et al.* (2017) também identificaram que essa metodologia era a mais aplicável para o fenômeno de galgamento pois fornecem valores razoáveis para a vazão de pico e o tempo de pico.

As vazões extremas, muito altas e muito baixas, foram desconsideradas para a análise, ou seja, aquelas resultantes das equações de Costa (1985), Schoklistch (1917), Evans (1986), Institution Of Civil Engineers (1996), USBR (1982), Singh (1996), Hagen (1982) e Wetmore e Fread (1981).

A equação de Saint Venant é mais aplicável em casos de remoção instantânea e total do barramento, que não é o objetivo deste estudo, sendo ele realizado para uma ruptura parcial da estrutura. As fórmulas empíricas de Kirkpatrick (1977) e de Soil Conservation Service (1981) consideram apenas a carga hidráulica, alterando os coeficientes. Por fim, a equação de Lou (1981), apesar de ser baseada na análise de 19 (dezenove) diferentes casos de ruptura de natureza diversa, também foi descartada junto com as demais por apresentar-se inferior a de Froehlich (1995).

Dessa maneira, considera-se o maior valor de vazão de pico dentre as duas equações que mais se aplicariam ao estudo de ruptura por galgamento (Lou,1981 e Froehlich,1995) por questão de aumentar o coeficiente de segurança. Esse fator de segurança deve ser levado em consideração em virtude das possíveis incertezas inerentes ao estudo de ruptura de barragem, vinculadas ao modelo, ao usuário e às condições particulares a cada acidente.

A análise referente ao tempo de ruptura também levou em consideração a segurança do estudo, mediante a escolha de tempos extremos, máximo e mínimo para este estudo.

Para tanto, foi definido o tempo de ruptura de 0,29 horas como valor mínimo e 0,70 horas como valor máximo.

O tempo de pico de 0,29 horas foi decidido para este estudo por ser o mínimo e consequentemente necessitar de ações emergenciais mais ágeis de maneira a evitar perdas muito significativas na comunidade de jusante. Posteriormente foi construído o hidrograma de ruptura do tipo parabólico, Figura 3 (WALTHER *et al.*, 2000 *apud* LAURIANO, 2009).

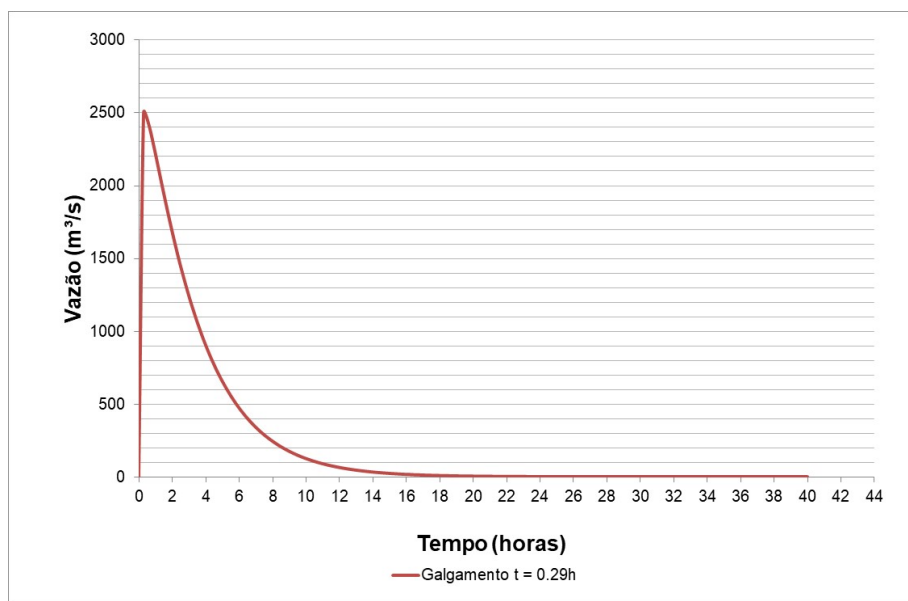


Figura 3 – Hidrograma de ruptura com decaimento parabólico para tempo de pico de 0,29 horas

O hidrograma apresentado na Figura 3 apresenta a vazão de pico de 2.501,06 m³/s no tempo de pico calculado em 0,29 horas. Depois, há o decaimento até zerar a vazão de saída na brecha num tempo aproximado de 16 horas.

5.2 ANÁLISE DOS DADOS UTILIZADOS NA MODELAGEM MATEMÁTICA

Os dados utilizados para a modelagem matemática foram: geometria, hidrograma de ruptura e a declividade do trecho na seção de jusante. Eles foram obtidos secundariamente via banco de dados públicos, tal como sítios da Embrapa (imagens SRSTM) e do INEMA (dados estruturais do barramento). Cabe destacar que há dificuldade na obtenção de informações minuciosas da área considerada para alcançar esse tipo de estudo, limitando-se a análise.

A geometria é representada pelo modelo digital de terreno (MDT), a qual foi obtida através de curvas de nível a cada 5 m. A Figura 4 ilustra as curvas e o MDT da área de estudo. Verifica-se que quanto menor é a resolução espacial, ou seja, quanto menor for as distâncias entre as curvas de nível, melhor será a identificação dos detalhes topográficos. Além disso, as imagens de satélite SRTM não delimitam a calha d'água com exatidão, estabelecendo percentual de erro neste estudo devido principalmente à possíveis assoreamentos de trechos e/ou presença de dispositivos de macrodrenagem visto que trata-se de trecho de rio na zona urbana.

Apesar das limitações encontradas na obtenção de dados e construção da geometria, a análise da abrangência da onda de cheia foi realizada de forma simplificada. Conseqüentemente, as ações emergenciais comumente propostas no PAE são passíveis de erro acumulado, pois são elaboradas com base nesses resultados.

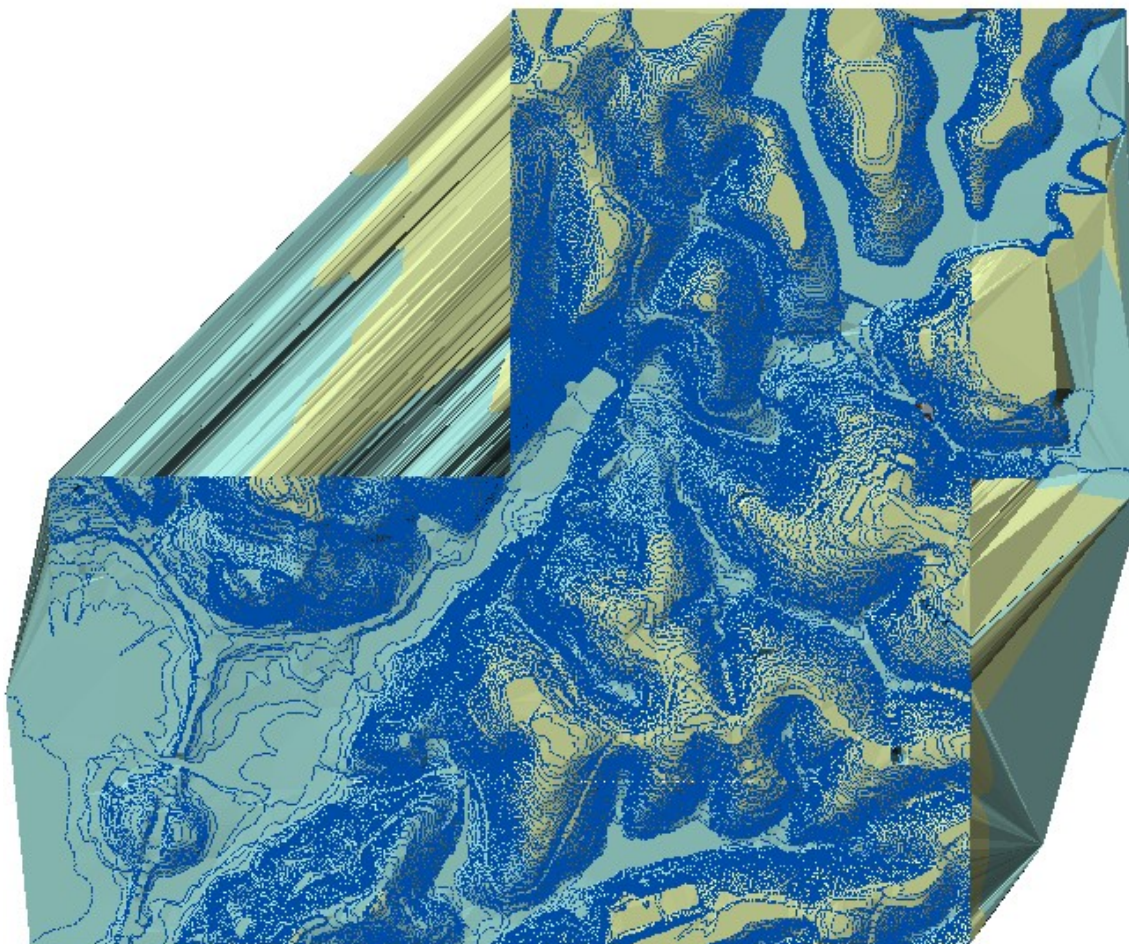


Figura 4 – Modelo Digital de Terreno da área de estudo

O hidrograma de ruptura, obtido em função da vazão e do tempo de pico, possui o objetivo de estabelecer ao modelo a vazão no tempo que passará pela brecha e pelo vale de jusante, num fenômeno de galgamento. Esse hidrograma é considerado na modelagem hidrodinâmica como uma condição de contorno da área de estudo.

A declividade utilizada também como condição de contorno para o modelo foi estimada em 0,01935m/m. Essa informação correspondeu a inclinação da superfície do terreno em relação à diferença de altura entre as duas seções mais a jusante da área de estudo e a distância horizontal entre elas.

A partir do exposto, verifica-se que o modelo escolhido se adéqua ao presente estudo em função da baixa requisição de dados para a simulação, não exigindo detalhamentos de dados da barragem, tais como o tipo e a localização espacial de todos os dispositivos de saída. Também não precisaria realizar o formato da ruptura da estrutura, visto que o hidrograma de ruptura já foi definido previamente. Além disso, esse estudo não trata da análise da forma da brecha, mas sim da abrangência da propagação da onda de cheia e o impacto causado por ela na comunidade que reside à jusante da Barragem do Cobre.

5.3 SIMULAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DA ONDA DE CHEIA À JUSANTE DA BARRAGEM

Os dados levantados sobre a Barragem do Cobre permitiram realizar a simulação através de modelagem matemática em toda a extensão do trecho de jusante, 2.500 metros. No referente trecho, foram definidas 32 (trinta e duas) seções transversais obtidas através da superfície do terreno originada pelas elevações das curvas de nível da área de estudo com o auxílio do software AutoCad Civil 3D, conforme mencionado no item 5.2.

Após a identificação do fluxo d'água e das seções transversais, a geometria foi exportada para o HEC-RAS, conforme Figura 5. Considerou-se tanto o canal do rio quanto o prolongamento das margens esquerdas e direitas, sendo elas realizadas de maneira aleatória. Observa-se a limitação na identificação minuciosa do cadastro topográfico da calha, a qual pode se encontrar ora em condição natural ora revestida artificialmente, pois corta área urbanizada.

A Figura 6 apresenta a primeira seção imediatamente a jusante da barragem. Nesta seção existe uma residência que era utilizada como apoio aos funcionários da EMBASA no período em que a barragem estava em operação com a finalidade de abastecimento humano. Atualmente, considera-se que esta residência não possui moradores pois servia apenas como ponto de apoio aos funcionários da EMBASA quando a barragem estava em operação.

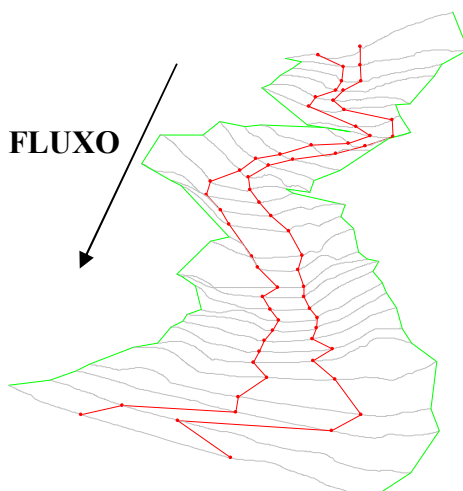


Figura 5 – Seção imediatamente a jusante da Barragem do Cobre

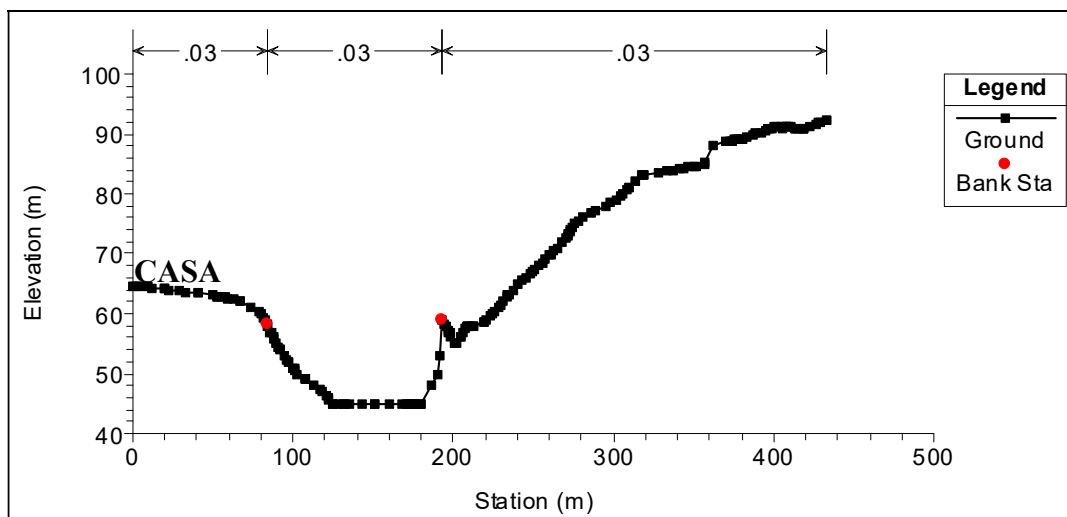


Figura 6 – Primeira Seção a jusante da Barragem

Um parâmetro hidráulico associado à geometria é o Coeficiente de Manning. Esse valor é inserido para cada seção identificada no modelo, podendo ser estabelecido um único valor ou diferentes coeficientes para as margens e calha do rio. O coeficiente aplicado neste estudo considerou as características físicas da região. Entretanto, segundo Tschiedel e Paiva (2018) esse parâmetro possui alta sensibilidade na modelagem numérica e exerce muita influência num estudo de ruptura. Dessa forma, pode-se atrelar incertezas na definição do coeficiente de Manning que foi de 0,03 para todas as seções, considerando serem canais com leito pedregoso e talude vegetado, conforme Porto (1998).

A simulação no modelo HEC-RAS apresentou como resultados os parâmetros de profundidade, velocidade e vazão para todo o trecho de estudo. O Quadro 5 apresenta os valores mínimos, médios e máximos encontrados na simulação.

Quadro 5 – Resultados da simulação de ruptura da Barragem do Cobre – Salvador, BA

Parâmetros	Mínimo	Médio	Máximo
Cota (m)	3,2	16,53	48,20
Velocidade (m/s)	0	6,67	26,46
Vazão (m ³ /s)	0	2.315,97	3.221,29

No Quadro 5 verifica-se que a vazão máxima encontrada na simulação é 1,29 maior que a vazão de pico que sai da brecha num tempo de pico de 0,29 horas, estimada em 2.501,06 m³/s. Esse fato é gerado pelas diferentes áreas e velocidades (em função da declividade da geometria) existentes no vale de jusante.

5.4 CONSTRUÇÃO DO MAPA DE INUNDAÇÃO E ANÁLISE DO IMPACTO

Os resultados obtidos para a Barragem do Cobre permitiram identificar espacialmente o avanço da onda de cheia do fenômeno de galgamento no trecho a jusante do barramento.

A partir das curvas de nível georreferenciadas, construiu-se o modelo digital de terreno, apresentado na Figura 7 (a) no trecho a jusante da barragem do Cobre. Os resultados do HEC-RAS foram exportados em formato de arquivo .sdf e transformado no formato

.xml pelo HEC-Georas. Após essa transformação, importou-se a delimitação da superfície d'água e a abrangência da inundação, conforme Figura 7 (b).

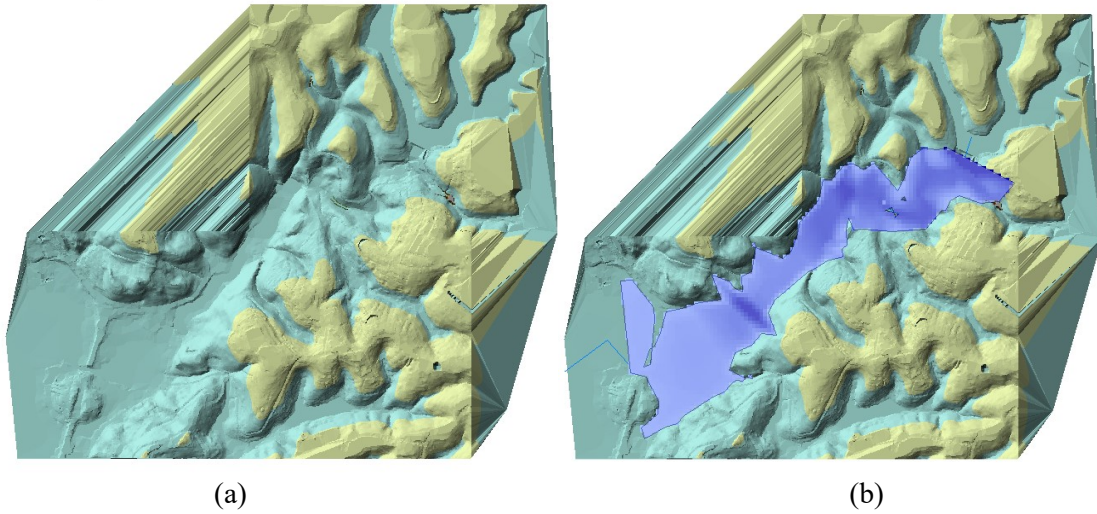


Figura 7 – Modelo Digital de Terreno da área de estudo sem (a) e com (b) o resultado da mancha

A mancha de inundação foi transferida para uma imagem de satélite do Google Earth, onde pode-se observar a presença de mata atlântica preservada e de casas dentro de sua delimitação apontadas pelos pontos amarelos na Figura 8.

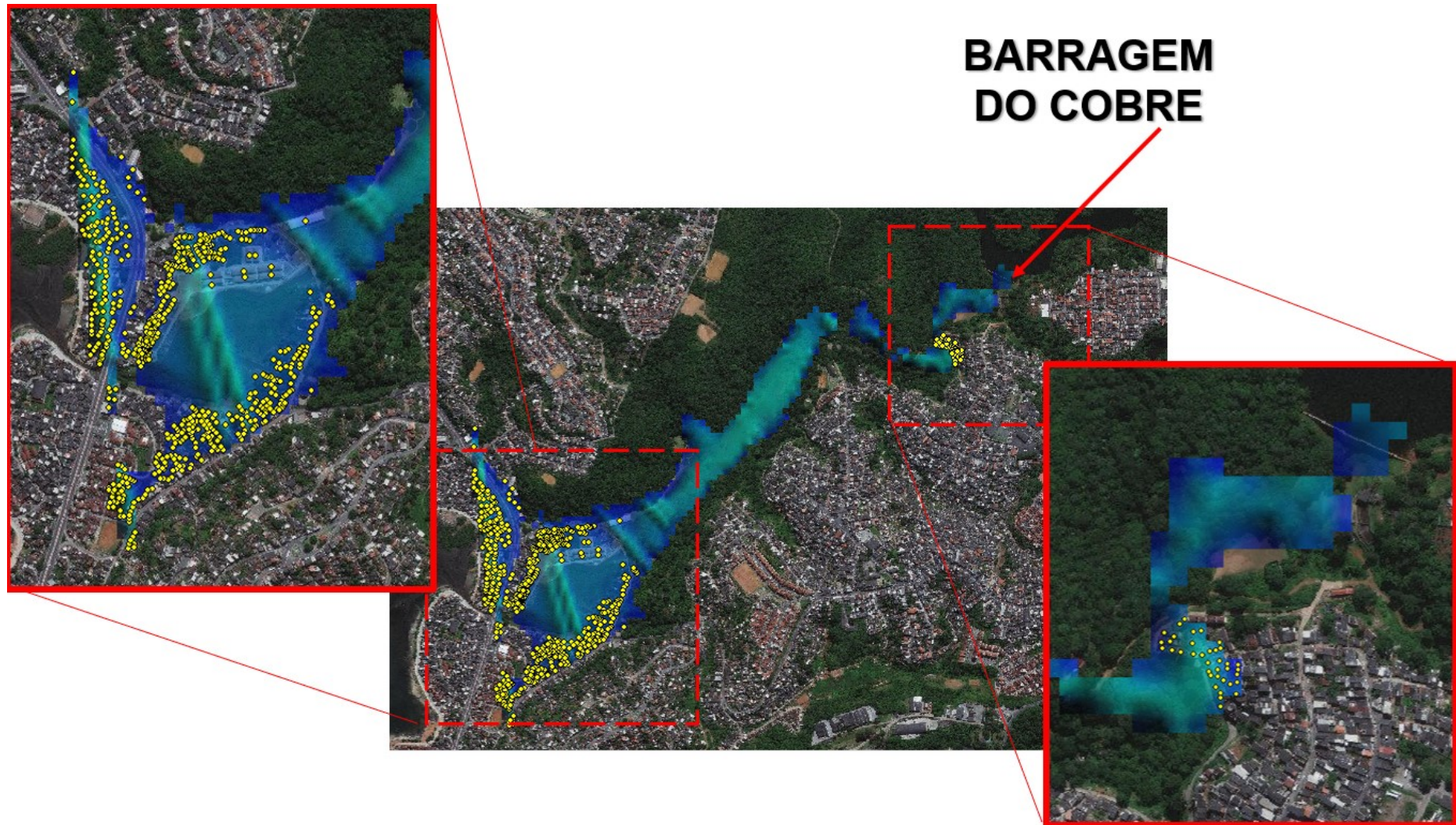


Figura 8 – Mapa de inundação da área de estudo com destaque para os pontos amarelos representando residências

A partir dos resultados da encontrados, verifica-se que a ruptura da barragem aumenta significativamente com a elevação máxima da superfície da água no trecho de jusante, sendo reduzida à medida que a onda vai se propagando e alcançando a região da foz, localizada na Baía de Todos os Santos (Quadro 6). Cabe ressaltar que a localização das seções estão identificadas na Figura 9.

Quadro 6 – Resultados por seção da simulação de ruptura da Barragem do Cobre – Salvador, BA

SEÇÕES	DESCRIÇÃO	PARÂMETROS MÁXIMOS				
		Cota do terreno (m)	Cota simulada (m)	Altura D'água (m)	Velocidade (m/s)	Vazão (m³/s)
S1	Seção imediatamente a jusante do barramento, onde há uma casa	44,17	48,2	4,03	11,38	2.498,46
S2	Primeira região onde há inundação de 22 residências	26	32,3	6,3	7,46	2.486,2
S3	Localidade do centro de referência do Parque São Bartolomeu	1,13	4,86	3,73	4,58	2.726,42
S4	Possui aglomerados residenciais em ambas as margens	1,03	4,71	3,68	2,55	2.632,25
S5		1	4,07	3,07	4,03	2.997,19
S6	Possui casas residenciais e alcança importante via municipal (Av. Afrânio Peixoto)	0,99	2,36	1,37	5,55	3.118,49

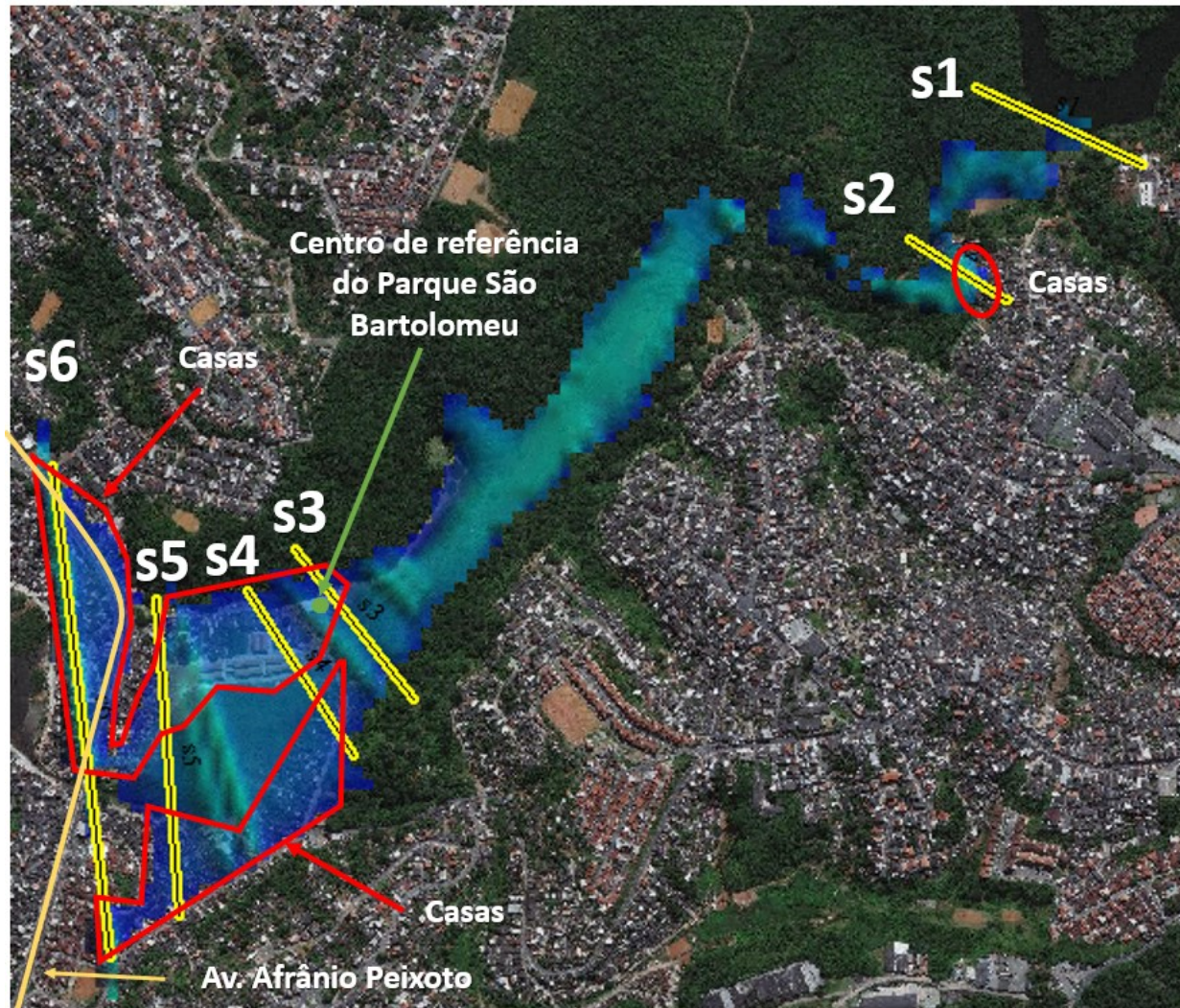


Figura 9 – Seções com os parâmetros hidráulicos identificados no Quadro 6

A barragem apresenta uma altura de 19 metros (m), o seu coroamento está na cota 58 m e a cota inferior do talude de jusante está na cota 44,17 m. O trecho imediatamente a jusante do barramento (s1 na Figura 9) é o mais atingido, visto que com a ruptura a elevação da água máxima está na cota 48,2m, ou seja, a altura do nível d'água é de 4,03 metros numa situação de galgamento.

A onda de cheia impactará uma área total de 3.500 km² do vale de jusante, no âmbito ambiental e social. Espécies preservadas da mata atlântica poderão sofrer arrastes em função da alta velocidade da inundação (máxima de 26.46 m/s). Em função da região não possuir cadastro georreferenciado destas espécies de plantas, não foi possível quantificar essas perdas. Entretanto, observa-se que aproximadamente 2.000 km² de área verde da Área de Proteção Ambiental (APA) Bacia do Cobre será atingida.

Nesta APA encontra-se o Parque São Bartolomeu (s3 na Figura 9), a 2.000 km a jusante do barramento, que obteve sua estrutura revitalizada no ano de 2014 (CORREIO DA BAHIA,2014) e também será afetado pela propagação da onda de cheia. Esse parque tem o objetivo de integrar a comunidade com a mata remanescente existente dentro do perímetro urbano e por isso está periodicamente recebendo visitantes.

Na seção s3, a inundação chegará a uma velocidade máxima de 4,58 m/s e altura d'água de 3,73 metros. Esses valores são capazes de cobrir e arrastar pessoas. Como o parque tem o intuito de ser bastante visitado, há possibilidade de haver muitas perdas humanas nesta localidade, mesmo estando à 2.000 km do eixo da barragem.

Com relação ao impacto social, constata-se que a região do vale de jusante da Barragem do Cobre é ocupada predominantemente por famílias de classe de renda baixa e encontra-se em crescimento populacional. Nos três aglomerados residenciais identificados na Figura 9 foram contabilizadas, através da imagem de satélite, aproximadamente 500 casas dentro do limite da mancha de inundação.

Aplicando-se o coeficiente de 3,1 moradores/domicílio, segundo censo para o município de Salvador/BA do IBGE (2010), tem-se que a onda de inundação ocasionada em função do fenômeno de galgamento da Barragem do Cobre impactará um total aproximado de 1.550 pessoas.

Na seção s6 foi observado que além da vegetação e das casas inundadas, existe a possibilidade de inundação da Avenida Afrânio Peixoto que é uma via rodoviária importante para o subúrbio da cidade de Salvador e bastante movimentada. Nesta localidade a onda de cheia obtém parâmetros máximos de velocidade de 5,55 m/s, sendo suficiente para ocasionar uma enxurrada e arrastar pessoas e veículos. Nota-se no Quadro 6 que na proximidade da foz do rio do Cobre (s6 na Figura 9) a elevação do nível d'água simulada está na cota de 2,36 m. Subtraindo-se da cota do terreno (0,99m), a altura d'água nesta seção é estimada em 1,37 m, o equivalente a metade da parede de uma casa térrea.

6 CONCLUSÃO

Este estudo objetivou na análise da propagação da onda de cheia causada pelo rompimento hipotético da Barragem do rio do Cobre através da delimitação da área de inundação, situado na cidade de Salvador-BA. Essa pesquisa fundamenta a elaboração do PAE (Plano de Ação Emergencial) onde serão estabelecidas “as ações a serem executadas pelo empreendedor da barragem em caso de situação de emergência, bem como identificará os agentes a serem notificados dessa ocorrência” (BRASIL,2010).

As características estruturais da barragem ao serem aplicadas nas formulações de Froehlich (1995) e Von Thun & Gillette (1990), resultaram, respectivamente, numa vazão de pico de 2.501,06 m³/s e num tempo de pico de 0,29 h. O hidrograma de ruptura, do tipo parabólico, foi definido com base na equação identificada por WALTHER *et al.* (2000) *apud* LAURIANO (2009).

Através da obtenção dos dados topográficos, hidrológicos e hidráulicos e com o auxílio da modelagem hidrodinâmica simulou-se a onda de cheia. O modelo utilizado foi o HEC-RAS versão 4.1 por possibilitar a inserção de dados simplificados e ser de livre e fácil acesso. Como resultados, a onda simulada com o hidrograma de ruptura abrange uma área de 3.500 km². Ela inicia-se com uma altura máxima de 4,03 m imediatamente a jusante do barramento, finalizando com 1,37 m (máxima), equivalente a metade do pé direito de uma casa térrea e num tempo de pico inferior a 18 minutos, durando até aproximadamente 10 horas.

Da modelagem foi construído o mapa de inundação do trecho de jusante da Barragem do Cobre, localizada em Salvador, Ba. A construção deste mapa auxilia na identificação da área diretamente atingida pela onda de cheia. Este é um dos instrumentos necessários do PAE de acordo com a PNSB (Política Nacional de Segurança de Barragens).

Para tanto, neste estudo do rompimento hipotético por galgamento pode-se verificar as zonas que serão impactadas num acidente desta magnitude, com mata atlântica preservada e as que se encontram com elevado grau de urbanização. A área da barragem deste estudo está inserida numa Área de Proteção Ambiental (APA). Logo, constata-se que esta ruptura impactará a nível ambiental e social, perdendo tanto a flora e fauna remanescente quanto residências onde habitam aproximadamente 1.550 pessoas.

Apesar de ser um recurso bastante aplicado na gestão da segurança da barragem, este estudo traz consigo algumas incertezas vinculadas tanto com a geometria, quanto com as equações matemáticas aplicadas na preparação das condições de contorno, pelo modelo unidimensional utilizado e na contagem das residências abrangidas pela delimitação da mancha de inundação. Logo, verifica-se a necessidade em obter informações mais precisas referentes à topografia do vale de jusante, ao cadastro residencial desta área de estudo e das espécies de plantas existentes na APA Bacia do Cobre.

7 REFERÊNCIAS

ANA – Agência Nacional de Águas. FPTI – Fundação Parque Tecnológico de Itaipu – Brasil. Curso Segurança de Barragem. **Módulo III: gestão e desempenho de barragens unidade 2: planos de ações de emergência.** Disponível em: https://capacitacao.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/110/28/Unidade_2-modulo3.pdf

ANA - Agência Nacional de Águas. **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens Guia de Orientação e Formulários do Plano de Ação de Emergência – PAE.** Volume IV. 2013. Disponível em: <<http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/downloads/volume-iv-guia-de-orientacao-e-formularios-dos-planos-de-acao-de-emergencia-2013-pae>>.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Relatório de segurança de barragens 2016. Versão 06 – Após sugestões SAS.** Brasília. 2016. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/cadastros/barragens/Seguranca/RelatorioSegurancaBarragens_2016.pdf>

ANA - Agência Nacional de Águas. **Aula 5 – Viabilidade de Barragens.** Curso de Segurança de Barragens DAEE. São Paulo. 2016.

ANA - Agência Nacional do Águas. **Relatório de segurança de barragens: 2017.** Brasília, 2018

APEL, H., ARONICA, G. T., KREIBICH, H., & THIEKEN, A. H. (2008). **Flood risk analyses—how detailed do we need to be?** *Natural Hazards*, 49(1), 79–98. doi:10.1007/s11069-008-9277-8

Asnaashari, A., Meredith, D., & Scruton, M. (2014). **Dam Breach Inundation Analysis Using HEC-RAS and GIS - Two Case Studies in British Columbia, Canada.** Canadian Dam Association Annual Conference. Banff, Alberta.

BASHEER, T. A.; WAYAYOK, A.; YUSUF, B.; KAMAL, M. R. **Dam Breach parameters and their influence on flood hydrographs for Mosul Dam.** *Journal of Engineering Science and Technology*, v. 12, n. 11, p. 2896-2908, 2017.

BRASIL, L.S.S. **Utilização de modelagens uni e Bidimensional para a propagação de Onda de cheia proveniente de ruptura Hipotética de barragem. Estudo de Caso: barragem de rio de Pedras – MG.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG. Belo Horizonte, 2005a.

BRASIL, L.S.S.; PALMIER, L.F.; NASCIMENTO, N.O.; BOTELHO, L.C.M.; CAMPBELL, C.G.; DINIZ, T.M. da. F. **Modelagem unidimensional de onda de cheia proveniente de ruptura hipotética de barragem - Estudo de caso: barragem de Rio de Pedras, Minas Gerais, Brasil.** XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa, 2005b.

BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). **Resolução nº143/2012 – Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume.** Brasília. 2012.

BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Presidência da República. Casa Civil. Brasília, DF, 20 de Setembro de 2010.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 001, de 23 de janeiro de 1986**. Brasília, 1986.

CORDEIRO, M.R.A.. **Estudo da influência da urbanização na condição hídrica da bacia do rio do cobre – Salvador-Bahia**. Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana. Salvador, 2009.

CORREIO DA BAHIA. **Parque São Bartolomeu é entregue revitalizado**. Salvador, 2014.

FERLA, R.; PRIEBE, P. S.; NOVAKOSKI, C. K.; HAMPE, R.S.; SALIBA, A. P.M.; TEIXEIRA, E. D.; MARQUES, M. G. **Utilização de diferentes equações empíricas na previsão de características de inundação proveniente do rompimento de barragens**. SILUSBA. Porto, 2017.

FERREIRA, A.L.M.; ANDRZEJEWSKI, E.A. **Comparação de métodos de cálculo da ruptura de uma barragem hipotética**. XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens. Comitê Brasileiro de Barragens/CBDB. Foz do Iguaçu, 2015.

FROEHLICH D. C. (2016). **Predicting Peak Discharge from Gradually Breached Embankment Dam**. Journal of Hydrologic Engineers (ASCE).

HEC. Hydrologic Engineering Center. **HEC-RAS River Analysis System – User’s Manual**. US Army Corps of Engineers, 2010.

Hicks, F., & Peacock, T. (2005). **Suitability of HEC-RAS for flood forecasting**. Canadian Water Resources Journal, 30(2), 159-174

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades: Salvador. Censo 2010**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ba/salvador/pesquisa/23/27652>>.

Khattak, M. S., Anwar, F., Saeed, T. U., Sharif, M., Sheraz, K., & Ahmed, A. (2016). **Floodplain mapping using HEC-RAS and ArcGIS: A case study of Kabul river**. Arab J Sci Engg, 41, 1375-1390.

KUMAR, S.; JASWAL, A.; PANDEY, A.; SHARMA, N. **Literature review of Dam Break studies and inundation mapping using hydraulic models and GIS**. International Research Journal of Engineering and Technology, v. 4, p. 55-61, 2017.

LAURIANO, A. W. **Estudo de Ruptura da Barragem de Funil: Comparação entre os Modelos FLDWAV e HEC-RAS**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG. Belo Horizonte, 2009.

MASCARENHAS, F.C.B., 1990. **Modelação Matemática de Ondas Provocadas por ruptura de Barragens**. Tese de Doutorado apresentada à COPPE/UFRJ para obtenção do título de Doutor em Ciências em Engenharia Civil. Rio de Janeiro, RJ.

MOHARRAMPOUR, M.; KHODABANDESHAHRKI, A.; KATUZI, M. **Dam-break flood plain model by WMS**. 2nd International Conference on Environmental Engineering and Applications IPCBEE vol.17. IACSIT Press, Singapore. 2011.

MOLINARI, D., DE BRUIJN, K. M., CASTILLO-RODRÍGUEZ, J. T., ARONICA, G. T., & BOUWER, L. M. (2018). **Validation of flood risk models: Current practice and possible improvements**. International Journal of Disaster Risk Reduction. doi:10.1016/j.ijdrr.2018.10.022

Moya Quiroga, V., Kure, S., Udo, K., & Mano, A. (2016). **Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5**. RIBAGUA, 3, 25-33.

PIERCE, M. W., THORNTON, C. I., & ABT, S. R. (2010). **Predicting Peak Outflow from Breached Embankment Dams**. Journal of Hydrologic Engineering, 15(5), 338–349. doi:10.1061/(asce)he.1943-5584.0000197

PILOTTI M, MARANZONI A, MILANESI L; TOMIROTTI, M.; VALERIO, G. (2014) **Dam-break modeling in alpine valleys**. Journal of Mountain Science 11(6). DOI: 10.1007/s11629-014-3042-0

Qi, H., & Altinakar, M. S. (2012). **GIS-BAsed Decision Support System for Dam Break Flood Management under Uncertainty with Two-Dimensional Numerical Simulations**. Journal of Water Resources Planning And Management, ASCE, 138(4), 334-341

Salajeghah, A., Bakhshaei, M., Chavoshi, S., Keshtkar, A., & Najafi Hajivar, M. (2009). **Floodplain mapping using HECRAS and GIS in semi-arid regions of Iran**. DESERT, 14, 83-93.

SANTOS, J.J.; SANTOS JUNIOR, A.; PITA, N.S.; CONCEIÇÃO, E.K.S.; SOUZA, V.M.B.; FARIA, A.C.F.. **Qualidade Das Águas Das Bacias Hidrográficas Da Cidade De Salvador E Do Município De Lauro De Freitas, Bahia**. Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA). p. 97-124, 2018 – ISSN: 2317-563X

ShahiriParsa, A., Heydari, M., Sadeghian, M. S., & Moharrampour, M. (2013). **Flood Zoning Simulaion by HECRAS Model (Case Study: Johor River - Kota Tinggi Region)**. Journal of River Engineering, 1(1).

SONINBAYAR J., AUDRA P. (2018) **Dam Break Simulation Using DHI-MIKE21 in the Eg Hydropower Plant, Mongolia**. In: Gourbesville P., Cunge J., Caignaert G. (eds) Advances in Hydroinformatics. Springer Water. Springer, Singapore.

TIMBADIYA, P. V., PATEL, P. L., & POREY, P. D. (2012). **HECRAS based hydrodynamic model in prediction of stages of lower Tapi river**. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 17(2), 110-117.

TSCHIEDEL, Arthur da Fontoura; PAIVA, Rodrigo Cauduro Dias de. **Avaliação de incertezas em simulações hidrodinâmicas de ondas geradas por rompimento de barragens**. RBRH [online]. 2018, vol.23, e30. Epub July 30, 2018. ISSN 1414-381X.

<http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.231820170074>.

VERÓL, Aline Pires. **Simulação da propagação de onda decorrente de ruptura de barragem, considerando a planície de inundação associada a partir da utilização de um modelo pseudo-bidimensional**. 2010. 217 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2010.

WISEU, T. **Segurança dos Vales a Jusante de Barragens – Metodologias de Apoio à Gestão dos Riscos**. (Tese Doutorado) – Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2006.

WAHL, T.L. **Uncertainty of Predictions of Embankment Dam Breach Parameters**. JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING © ASCE / MAY 2004.

WAHL, T.L.. **Dam breach modeling – an overview of analysis methods**. Joint Federal Interagency Conference on Sedimentation and Hydrologic Modeling June 27 - July 1, 2010 -- - Las Vegas, NV.

Xiong, Y. (. (2011). **A dam break analysis using HEC-RAS**. Journal of Water Resource and Protection, 370-379.

Yang, J., Townsend, D., & Daneshfar, B. (2006). **Applying the HEC-RAS model and GIS techniques in river network floodplain delineation**. Can.J.Civ.Engg, 33, 19-28.

YAVAŞOĞLU, H. H.; KALKAN, Y.; TIRYAKIOĞLU, İ.; YIGIT, C .O.; ÖZBEY, V.; ALKAN, M. N.; BILGI, S.; ALKAN, R. M.. **Monitoring the deformation and strain analysis on the Ataturk Dam, Turkey**, Geomatics, Natural Hazards and Risk, 9:1, 94-107, 2018.

Yerramilli, S. (2012). A Hybrid approach of Integrating HEC-RAS and GIS towards the Identification and Assessment of flood risk vulnerability in the city of Jackson, MS. American Journal of Geographic Information System, 7- 16.

Yochum, S. E., Goertz, L. A., & Jones, P. H. (2008). **Case Study of the Big Bay Dam Failure: Accuracy and Comparison of Breach Predictions**. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 134(9), 1285-1293.