



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL (RECURSOS
HÍDRICOS)

RUTE CAVALCANTE PEREIRA

BORDA LIVRE E SEGURANÇA DE BARRAGENS: DA TRADIÇÃO
METODOLÓGICA AO DESAFIO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

FORTALEZA

2025

RUTE CAVALCANTE PEREIRA

BORDA LIVRE E SEGURANÇA DE BARRAGENS: DA TRADIÇÃO METODOLÓGICA
AO DESAFIO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientadora: Prof.^a Dra. Ticiania Marinho de Carvalho Studart

Coorientador: Dr. Victor Costa Porto

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P495b Pereira, Rute Cavalcante.
Borda livre e segurança de barragens : da tradição metodológica ao desafio das mudanças climáticas / Rute Cavalcante Pereira. – 2025.
93 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2025.

Orientação: Profa. Dra. Ticiano Marinho de Carvalho Studart .

Coorientação: Prof. Dr. Víctor Costa Porto.

1. Borda livre. 2. Segurança de barragens. 3. Mudanças climáticas. 4. Semiárido nordestino. 5. Dimensionamento de barragens. I. Título.

CDD 627

RUTE CAVALCANTE PEREIRA

BORDA LIVRE E SEGURANÇA DE BARRAGENS: DA TRADIÇÃO METODOLÓGICA
AO DESAFIO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em: 25 / 07 / 2025,

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dra. Ticiano Marinho de Carvalho Studart (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Victor Costa Porto (Coorientador)
Centro Estratégico de Excelência em Políticas de Águas e Secas – CEPAS/UFC

Dra. Alyson Brayner Sousa Estacio
Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME

Dra. Maria Aparecida Melo Rocha Estacio
Centro Estratégico de Excelência em Políticas de Águas e Secas – CEPAS/UFC

AGRADECIMENTOS

À Santíssima Trindade, Pai, Filho e Espírito Santo pelo dom da vida, do entendimento, da sabedoria e da ciência. À Maria Santíssima sob as invocações de Nossa Senhora de Fátima e Imaculada Conceição, pois nunca sou desamparada quando recorro à vossa proteção.

À minha família, que sempre me apoia e me impulsiona nos meus objetivos e sonhos. Em especial à minha mãe Maria Socorro, que sempre me incentivou a estudar e a buscar crescer na vida por meio dos estudos. Aos meus irmãos, Beatriz e Natã, obrigada por serem meus melhores amigos e acreditarem em mim.

Gratidão especial ao meu irmão Natã e à Marina, sua esposa, pois me deram abrigo em Fortaleza durante o mestrado, me proporcionaram conforto, apoio psicológico, e o amor da sua cachorrinha Billie.

Ao meu noivo Enmanuel que esteve ao meu lado me ouvindo e me apoiando nos últimos anos, e à sua mãe Izabel Cristina que também me deu abrigo e apoio incondicional tantas vezes nesse percurso.

À minha orientadora, Professora Dra. Ticiano Marinho de Carvalho Studart, que me guiou e me orientou neste estudo, com seu bom humor e sua mente brilhante. Com sua carreira de destaque, a Professora Ticiano Studart é uma inspiração para mim desde o primeiro dia de aula.

Ao Dr. Alyson Brayner Sousa Estácio, ao Me. Carlos Eduardo Sousa Lima, ao Dr. Victor Costa Porto, e à Dra. Maria Aparecida Melo Rocha Estácio, pelas valiosas contribuições que foram dadas ao meu trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

Este estudo investigou as metodologias de dimensionamento da borda livre de barragens, desde suas origens até as práticas contemporâneas, e avaliou os impactos das mudanças climáticas sobre esses critérios de projeto, com aplicação específica às condições do semiárido nordestino brasileiro. Para tanto, realizou-se uma revisão sistemática da literatura, identificando a evolução das abordagens, os principais fatores de influência e as lacunas de conhecimento. Em seguida, desenvolveu-se e aplicou-se uma metodologia que integra cenários de mudanças climáticas ao dimensionamento da borda livre, utilizando como estudo de caso a Barragem Arrojado Lisboa (Açude Banabuiú), no estado do Ceará. Quantificaram-se os impactos das alterações climáticas sobre os parâmetros de projeto, contrastando os resultados obtidos das metodologias tradicionais (USACE, USBR e ANA) com aqueles derivados da consideração de cenários climáticos futuros. A análise de projeções futuras foi feita com os dados dos modelos climáticos do CMIP6 (Sexta Fase do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados), considerando dois cenários de emissão de gases de efeito estufa (SSP2-4.5 e SSP5-8.5). Os resultados demonstraram que as metodologias tradicionais subestimam os requisitos de borda livre ao não considerarem adequadamente as alterações climáticas futuras. Para a Barragem Arrojado Lisboa, a borda livre atual de 3,5 metros mostrou-se insuficiente quando confrontada com cenários de mudanças climáticas, que indicaram a necessidade de valores entre 5,01 e 7,05 metros. Observou-se que as mudanças nos padrões de precipitação extrema, e não as alterações nos regimes de vento, são o fator predominante para o aumento do requisito de borda livre no semiárido brasileiro, demandando uma quantificação padronizada nas diretrizes vigentes. A análise comparativa revelou divergências fundamentais entre os métodos tradicionais, atribuídas principalmente às diferentes premissas quanto à definição da velocidade do vento de projeto e à suposição de baixa probabilidade de ocorrência simultânea de cheia máxima e vento extremo. Este trabalho contribui significativamente para a literatura ao integrar, pela primeira vez no contexto do semiárido brasileiro, os impactos das mudanças climáticas nas precipitações extremas e nos regimes de vento em uma abordagem metodológica unificada para o cálculo da borda livre. Os achados reforçam a necessidade de atualização das diretrizes regulatórias para o dimensionamento de barragens, incluindo explicitamente os efeitos das mudanças climáticas e a quantificação das incertezas.

Palavras-chave: borda livre; segurança de barragens; mudanças climáticas; semiárido nordestino; dimensionamento de barragens.

ABSTRACT

This study investigated dam freeboard dimensioning methodologies, from their origins to contemporary practices, and assessed the impacts of climate change on these design criteria, with specific application to the conditions of the Brazilian semi-arid Northeast. To this end, a systematic literature review was conducted, identifying the evolution of approaches, key influencing factors, and knowledge gaps. Subsequently, a methodology integrating climate change scenarios into freeboard dimensioning was developed and applied, using the Arrojado Lisboa Dam (Banabuiú Reservoir) in Ceará state as a case study. The impacts of climate change on design parameters were quantified by contrasting results obtained from traditional methodologies (USACE, USBR, and ANA) with those derived from considering future climate scenarios. Future projections were analyzed using data from CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) climate models, considering two greenhouse gas emission scenarios (SSP2-4.5 and SSP5-8.5). The results demonstrated that traditional methodologies underestimate freeboard requirements by not adequately considering future climate changes. For the Arrojado Lisboa Dam, the current freeboard of 3.5 meters proved insufficient when confronted with climate change scenarios, which indicated the need for values between 5.01 and 7.05 meters. It was observed that changes in extreme precipitation patterns, rather than alterations in wind regimes, are the predominant factor for the increased freeboard requirement in the Brazilian semi-arid region, demanding standardized quantification in current guidelines. The comparative analysis revealed fundamental divergences among traditional methods, primarily attributed to different assumptions regarding design wind velocity definition and the supposition of a low probability of simultaneous occurrence of maximum flood and extreme wind. This work contributes significantly to the literature by integrating, for the first time in the Brazilian semi-arid context, the impacts of climate change on extreme precipitation and wind regimes in a unified methodological approach for freeboard calculation. The findings reinforce the urgent need to update regulatory guidelines for dam dimensioning, explicitly including the effects of climate change and the quantification of uncertainties.

Keywords: freeboard; dam safety; climate change; brazilian semi-arid northeast; dam design.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Localização da Bacia Hidrográfica do Banabuiú no estado do Ceará..... | 47 |
| Figura 2 – Área de interesse da Barragem do Banabuiú..... | 48 |
| Figura 3 – Metodologia de cálculo da borda livre de maneira sistemática..... | 51 |
| Figura 4 – Os 3 leques de fetch encontrados a partir da barragem..... | 52 |
| Figura 5 – Mapa básico de velocidade de vento (isopletas em m/s)..... | 54 |
| Figura 6 – Razão entre a velocidade do vento de qualquer duração U e a velocidade do vento de 1 hora U_{3600} | 56 |
| Figura 7 – Comparação das distribuições cumulativas..... | 61 |
| Figura 8 – Faixas de incerteza das projeções de velocidade do vento máximo anual para o cenário SSP2-4.5 (esquerdo) e para o cenário SSP5-8.5 (direito)..... | 69 |
| Figura 9 – Comparação das velocidades máximas do vento por período de retorno para cada modelo – parte 1..... | 74 |
| Figura 10 – Comparação das velocidades máximas do vento por período de retorno para cada modelo – parte 2..... | 74 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 – Trabalhos encontrados na literatura cinza..... | 23 |
| Quadro 2 – Trabalhos encontrados dentro da literatura acadêmica..... | 25 |
| Quadro 3 – Síntese das definições mais relevantes encontradas..... | 25 |
| Quadro 4 – Síntese das metodologias de cálculo da borda livre (BL)..... | 27 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 | – Ficha Técnica da Barragem Banabuiú..... | 48 |
| Tabela 2 | – Cálculo do Fetch Efetivo nas três direções analisadas..... | 51 |
| Tabela 3 | – Parâmetros estimados e valores de velocidade excedidos em 10% do tempo..... | 60 |
| Tabela 4 | – Comparação da qualidade dos ajustes..... | 61 |
| Tabela 5 | – Dados dos modelos climáticos usados no estudo..... | 65 |
| Tabela 6 | – Valores calculados seguindo as recomendações de cada fonte..... | 71 |
| Tabela 7 | – Teste de Kolmogorov-Smirnov..... | 72 |
| Tabela 8 | – Velocidades máximas anuais provenientes dos modelos climáticos..... | 72 |
| Tabela 9 | – 90° quantil das projeções climáticas de velocidade do vento máxima anual e sua variação percentual em relação ao período observado nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5..... | 75 |
| Tabela 10 | – Elevação da lâmina d'água para TR = 10.000 anos..... | 76 |
| Tabela 11 | – Valores calculados a partir da velocidade do vento máxima modelada considerando as mudanças climáticas..... | 76 |
| Tabela 12 | – Borda Livre Final (m)..... | 77 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 | Objetivos..... | 15 |
| 1.2 | Estruturação | 16 |
| 2 | SEGURANÇA DE BARRAGENS E A BORDA LIVRE: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DAS ABORDAGENS E EVOLUÇÕES METODOLÓGICAS | 17 |
| 2.1 | Introdução | 17 |
| 2.2 | Metodologia..... | 20 |
| 2.2.1 | <i>Definição das palavras-chave.....</i> | <i>20</i> |
| 2.2.2 | <i>Estratégias de busca</i> | <i>21</i> |
| 2.2.3 | <i>Busca geral</i> | <i>21</i> |
| 2.2.4 | <i>Repositórios de literatura científica</i> | <i>21</i> |
| 2.2.5 | <i>Documentos de instituições relevantes</i> | <i>21</i> |
| 2.2.6 | <i>Avaliação da qualidade dos estudos.....</i> | <i>21</i> |
| 2.2.7 | <i>Síntese dos resultados.....</i> | <i>22</i> |
| 2.3 | Resultados | 23 |
| 2.3.1 | <i>Estudos encontrados.....</i> | <i>23</i> |
| 2.3.2 | <i>Literatura cinza.....</i> | <i>23</i> |
| 2.3.3 | <i>Literatura acadêmica.....</i> | <i>24</i> |
| 2.3.4 | <i>Definições encontradas</i> | <i>25</i> |
| 2.3.5 | <i>Principais metodologias de dimensionamento</i> | <i>27</i> |
| 2.4 | Discussões | 28 |
| 2.4.1 | <i>A origem do conceito de borda livre.....</i> | <i>29</i> |
| 2.4.2 | <i>O conceito de borda livre.....</i> | <i>30</i> |
| 2.4.3 | <i>Fatores de influência considerados no dimensionamento.....</i> | <i>33</i> |
| 2.4.4 | <i>Metodologias de cálculo da borda livre</i> | <i>34</i> |
| 2.5 | Conclusão | 40 |
| 3 | IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO DIMENSIONAMENTO DA BORDA LIVRE DE BARRAGENS: ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM BANABUIÚ | 43 |

| | | |
|------------|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1 | Introdução | 43 |
| 3.2 | Metodologia..... | 45 |
| 3.2.1 | <i>Área de estudo.....</i> | 45 |
| 3.2.2 | <i>Dados utilizados.....</i> | 48 |
| 3.2.2.1 | <i>Dados da barragem.....</i> | 48 |
| 3.2.2.2 | <i>Dados climáticos</i> | 48 |
| 3.2.3 | <i>Descrição dos métodos de cálculo da borda livre.....</i> | 49 |
| 3.2.3.1 | <i>Cálculo do Fetch</i> | 50 |
| 3.2.3.2 | <i>Profundidade média ao longo do fetch.....</i> | 52 |
| 3.2.4 | <i>Metodologia U.S. Army Corps of Engineers (USACE).....</i> | 52 |
| 3.2.4.1 | <i>Determinação da velocidade do vento</i> | 53 |
| 3.2.4.1.1 | <i>Dados de vento</i> | 53 |
| 3.2.4.1.2 | <i>Velocidade do vento sobre a água</i> | 54 |
| 3.2.4.1.3 | <i>Frequência e duração da velocidade do vento.....</i> | 55 |
| 3.2.4.1.4 | <i>Velocidade do vento de projeto</i> | 56 |
| 3.2.4.2 | <i>Elevação do vento (wind setup).....</i> | 56 |
| 3.2.4.3 | <i>Altura e período de onda significativo</i> | 57 |
| 3.2.4.3.1 | <i>Altura extrema da onda.....</i> | 57 |
| 3.2.4.4 | <i>Avanço das ondas (wave run-up)</i> | 57 |
| 3.2.4.5 | <i>Cálculo da borda livre final.....</i> | 58 |
| 3.2.5 | <i>Metodologia U.S. Bureau of Reclamation (USBR).....</i> | 58 |
| 3.2.5.1 | <i>Determinação da velocidade do vento</i> | 59 |
| 3.2.5.2 | <i>Elevação do vento (wind setup).....</i> | 61 |
| 3.2.5.3 | <i>Altura e período de onda significativo</i> | 61 |
| 3.2.5.3.1 | <i>Altura extrema da onda.....</i> | 62 |
| 3.2.5.4 | <i>Avanço das ondas (wave run-up)</i> | 62 |
| 3.2.5.5 | <i>Cálculo da borda livre final.....</i> | 62 |
| 3.2.6 | <i>Metodologia Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA).....</i> | 62 |
| 3.2.6.1 | <i>Determinação do vento máximo</i> | 63 |
| 3.2.6.2 | <i>Elevação do vento (wind setup).....</i> | 63 |

| | | |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.6.3 | <i>Altura significativa da onda</i> | 63 |
| 3.2.6.4 | <i>Avanço das ondas (wave runup)</i> | 64 |
| 3.2.6.5 | <i>Cálculo da borda livre final</i> | 64 |
| 3.2.7 | <i>Metodologia alternativa considerando as mudanças climáticas no cálculo da borda livre</i> | 65 |
| 3.2.7.1 | <i>Ventos máximos nos cenários de mudanças climáticas</i> | 65 |
| 3.2.7.1.1 | Processamento dos dados dos modelos | 66 |
| 3.2.7.1.2 | Cálculo das velocidades máximas provenientes dos modelos climáticos 67 | |
| 3.2.7.2 | <i>Cheias extremas nos cenários de mudanças climáticas</i> | 68 |
| 3.2.7.3 | <i>Cálculo da borda livre final</i> | 68 |
| 3.2.7.3.1 | Determinação do vento máximo | 68 |
| 3.2.7.3.2 | Elevação do vento (<i>wind setup</i>) | 69 |
| 3.2.7.3.3 | Altura e período de onda significativo | 69 |
| 3.2.7.3.4 | Avanço das ondas (<i>wave run-up</i>) | 70 |
| 3.2.7.3.5 | Borda livre final | 70 |
| 3.3 | Resultados | 71 |
| 3.3.1 | <i>Análise das velocidades máximas provenientes dos modelos climáticos</i> | 72 |
| 3.3.2 | <i>Análise das cheias extremas nos cenários de mudanças climáticas</i> | 75 |
| 3.3.3 | <i>Análise da borda livre final considerando as projeções climáticas</i> | 76 |
| 3.4 | Discussões | 78 |
| 3.5 | Conclusão | 81 |
| 4 | CONCLUSÃO | 83 |
| | REFERÊNCIAS | 85 |

1 INTRODUÇÃO

A segurança de barragens representa um dos desafios mais críticos da engenharia hidráulica contemporânea, especialmente quando consideradas as mudanças climáticas em curso que alteram fundamentalmente os padrões hidrológicos e meteorológicos globais (Ahmadisharaf; Kalyanapu, 2015; Ghimire; Schulenberg, 2022). No contexto atual, onde eventos climáticos extremos tornam-se cada vez mais frequentes e intensos (Zhang et al., 2022; IPCC, 2023), é fundamental revisar os critérios usados para projetar e operar barragens e outras obras hídricas, garantindo assim a segurança dos recursos hídricos e a proteção das populações.

A borda livre da barragem, distância vertical entre o nível máximo normal de água e a crista da barragem, serve como um elemento fundamental de segurança para prevenir galgamentos e potenciais falhas estruturais. O galgamento é reconhecido como uma causa primária de ruptura de barragens, particularmente em barragens de terra, enfatizando a importância de uma borda livre adequada para garantir a segurança de barragens (Bocchiola; Rosso, 2014; Wan Ariffin et al., 2025).

A partir disso, surge a necessidade de um estudo aprofundado sobre o conceito de borda livre e as diferentes metodologias que influenciam o dimensionamento de barragens, tanto em âmbito internacional quanto no Brasil. Uma análise teórica robusta permite identificar lacunas significativas na literatura existente, além de oferecer uma perspectiva global sobre práticas de segurança e dimensionamento de barragens, o que é valioso para a padronização e melhoria das práticas locais.

Além disso, as mudanças climáticas introduzem incertezas significativas nos parâmetros tradicionalmente empregados no dimensionamento da borda livre de barragens, como as taxas de precipitação (Herbozo et al., 2022; Carvalho; Souza Filho; Sabóia, 2020) e os padrões de vento (Kara; Şahin, 2023; Raphaldini et al., 2020). Nesse sentido, surge também a necessidade de reavaliar e aprimorar as diretrizes de dimensionamento de borda livre de barragens, alinhando-as com padrões modernos de segurança diante dos aumentos de eventos climáticos extremos, pois há uma carência de estudos que integrem as mudanças climáticas aos fatores de influência para o cálculo da borda livre (Pereira; Studart, 2025).

No Brasil, essa problemática assume contornos particulares, especialmente no semiárido nordestino, onde o regime pluviométrico caracteriza-se por alta variabilidade temporal e espacial, com períodos de seca prolongada intercalados por eventos de precipitação intensa (Pontes Filho et al., 2020;). O estado do Ceará, inserido predominantemente neste contexto climático, abriga um significativo número de barragens que desempenham funções

essenciais de controle de cheias, abastecimento humano e irrigação (Carvalho; Souza Filho; Brito, 2024). Um estudo de caso nesse contexto pode fortalecer a fundamentação teórica e demonstrar a aplicabilidade prática das metodologias discutidas.

Apesar da relevância do tema, identifica-se uma lacuna significativa na literatura nacional quanto ao estudo específico da borda livre de barragens, bem como sobre a integração de cenários de mudanças climáticas nos critérios de dimensionamento. A ausência de diretrizes técnicas nacionais padronizadas e a dependência de metodologias internacionais, muitas vezes não adequadas às condições climáticas e hidrológicas brasileiras, evidenciam a necessidade urgente de pesquisas que abordem essa temática de forma abrangente e contextualizada.

Diante do exposto, este estudo busca avaliar criticamente as práticas atuais de dimensionamento da borda livre de barragens, integrando tanto o conhecimento consolidado das metodologias tradicionais quanto a necessidade de incorporar fatores relacionados às mudanças climáticas. Essa integração é realizada por meio de uma revisão sistemática que faz um estudo aprofundado sobre os aspectos que envolvem o dimensionamento da borda livre e identifica as metodologias de cálculo de borda livre mais utilizadas ao longo do tempo, além de observar o que os principais órgãos nacionais que tratam de diretrizes sobre dimensionamento de barragens apresentam sobre o tema.

Identificando lacunas no conhecimento e avaliando a adequação das práticas tradicionais frente aos novos padrões climáticos, aplica-se essa necessidade identificada através de um estudo de caso prático na Barragem Arrojado Lisboa, no estado do Ceará, comparando metodologias consolidadas (USACE, USBR e ANA) com abordagens que consideram cenários climáticos futuros, visando determinar se as mudanças climáticas causam alterações significativas nos cálculos de borda livre e contribuir para diretrizes mais robustas de segurança de barragens em regiões vulneráveis como o semiárido nordestino. Esta abordagem amplia a compreensão sobre os impactos das mudanças climáticas na segurança de barragem.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste estudo é investigar as metodologias de dimensionamento da borda livre de barragens, desde suas origens até as práticas contemporâneas, e avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre esses critérios de projeto, com aplicação específica às condições do semiárido nordestino brasileiro.

Para atender a este objetivo geral, a pesquisa tem os seguintes objetivos específicos:

- I. Realizar uma revisão sistemática da literatura sobre borda livre de barragens, identificando a evolução das metodologias, os principais fatores de influência no cálculo, e as lacunas do conhecimento na área.
- II. Apresentar o estado da arte do conhecimento sobre borda livre, desde os trabalhos pioneiros até as pesquisas mais recentes, identificando quais as principais fontes de referência para o dimensionamento.
- III. Desenvolver e aplicar uma metodologia que integre cenários de mudanças climáticas ao dimensionamento da borda livre, utilizando como estudo de caso a Barragem Arrojado Lisboa (Açude Banabuiú), no estado do Ceará.
- IV. Quantificar os impactos das alterações climáticas sobre os parâmetros de projeto, contrastando os resultados obtidos das metodologias tradicionais (USACE, USBR e ANA) com aqueles derivados dos modelos climáticos do CMIP6.

1.2 Estruturação

Esta dissertação organiza-se em formato de artigo científicos, contemplando quatro capítulos. O primeiro capítulo, intitulado “Introdução” apresenta a contextualização do problema, as justificativas e objetivos da pesquisa.

O segundo capítulo, intitulado "Borda Livre de Barragens: Uma Revisão Sistemática das Abordagens e Evoluções Metodológicas", realiza os objetivos específicos I e II, apresentando uma análise abrangente da literatura científica sobre o tema através de uma revisão sistemática, identificando tendências, lacunas e oportunidades de pesquisa.

O terceiro capítulo, "Impacto das Mudanças Climáticas no Dimensionamento da Borda Livre de Barragens: Estudo de Caso da Barragem Banabuiú", realiza os objetivos específicos III e IV, apresentando uma metodologia que incorpora projeções climáticas nos critérios de dimensionamento da borda livre, utilizando como estudo de caso a Barragem Arrojado Lisboa (Açude Banabuiú), e realiza uma análise comparativa entre as metodologias tradicionais de dimensionamento e a metodologia proposta.

O quarto e último capítulo, intitulado “Conclusão”, sintetiza as conclusões do estudo, e dá uma visão geral dos principais resultados e contribuições da pesquisa.

2 SEGURANÇA DE BARRAGENS E A BORDA LIVRE: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DAS ABORDAGENS E EVOLUÇÕES METODOLÓGICAS

2.1 Introdução

As barragens são estruturas construídas para conter água em grandes quantidades, permitindo que sejam regulados o fluxo e a distribuição de água. Mas, apesar das melhorias nas práticas de projeto e construção, sempre existe a possibilidade de situações adversas comprometerem sua segurança (Perini, 2009).

Um dos parâmetros essenciais para a segurança dessas estruturas é a borda livre, que ajuda a reduzir o risco de transbordamento e é determinante na classificação de risco de uma barragem (Tessema, 2020). No entanto, diante do cenário atual de mudanças climáticas, as variações extremas e imprevisíveis aumentam os riscos associados à segurança das barragens, impactando o nível dos reservatórios, o desempenho dos vertedouros e a operação da barragem como um todo (Herbozo et al., 2022).

A maioria das barragens foi projetada com base em condições climáticas históricas, o que pode resultar em vulnerabilidades diante das mudanças climáticas, aumentando o risco de falhas graves (Carneiro et al., 2022). Nesse contexto, é necessário aprimorar as abordagens de avaliação de segurança de barragens, integrando cenários climáticos atuais e futuros para otimizar os parâmetros de projeto e reduzir riscos estruturais (Furtado, 2024).

A borda livre da barragem é definida como a diferença entre a cota do topo da barragem e o nível máximo de cheia do reservatório, proporcionando uma margem de segurança contra falhas por transbordamento (galgamento). Essa distância vertical é condicionada não só pelos aspectos hidrológicos da barragem, mas também pelos ventos incidentes na área de interesse. Por isso, outro fenômeno climatológico importante a ser considerado é o vento, pois a ação do vento tem influência sobre aspectos fundamentais nos reservatórios (Marques, 2013).

A análise e previsão do comportamento variável e os padrões não lineares do vento é um dos problemas de pesquisa mais relevantes da atualidade (Assunção; Mattos Neto; Vasconcelos, 2022), pois o regime de vento está sofrendo alterações sob os efeitos das mudanças climáticas (Lima, 2024; Miranda et al., 2022; Raphaldini et al., 2020).

O estudo de Raphaldini et al. (2020) encontrou uma anomalia na oscilação dos ventos associada a mudanças climáticas extremas com tendência a se repetir, dificultando a previsão dos fenômenos meteorológicos associados ao ciclo de ventos. Portanto, torna-se essencial estar atento às diferentes metodologias existentes para lidar com essa problemática,

pois cada abordagem pode influenciar significativamente a precisão e a eficácia das previsões relacionadas ao comportamento dos ventos em cenários climáticos em transformação.

Os Relatórios de Segurança de Barragem (RSB) elaborados pela ANA apontam um aumento significativo nos acidentes e incidentes em barragens brasileiras nos últimos 5 anos (2019-2023) em comparação com períodos anteriores, destacando a influência de eventos climáticos intensos em diferentes meses. Em 2023 foram registrados 25 acidentes em barragens, dos quais nove tiveram o galgamento como mecanismo de falha principal (ANA, 2024). Os recentes acidentes no Brasil evidenciam a necessidade de ação mais eficaz por parte de empreendedores e do poder público (Nietsche, 2022). Portanto, há uma necessidade de aprimorar o conhecimento e as técnicas vinculadas ao processo de concepção e monitoramento de barragens.

De acordo com o International Commission on Large Dams (ICOLD, 2019), o galgamento é um dos modos de falha mais comuns em barragens, frequentemente causado por uma capacidade insuficiente dos vertedouros e por borda livre inadequada. A taxa de falhas aumentou quase 50% desde 2000, especialmente nos primeiros 10 anos de operação de barragens de terra. Outros estudos corroboram esse fato, pois Zhang et al. (2009) concluíram que a causa mais comum de falhas em barragens é o galgamento, que ocorre quando a altura da água de uma enchente ou de uma onda ultrapassa a altura do topo da barragem.

Além disso, um estudo realizado por Guidicini, Sandroni e Mello (2021) confirma que o galgamento é uma das causas mais frequentes de acidentes em estruturas de barragens. A situação é ainda mais crítica em barragens de contenção de rejeitos, que têm falhado com grande frequência e causado impactos ambientais e sociais significativos (Morrill et al., 2022). O International Council on Mining and Metals (ICMM, 2021) explica que instalações de rejeitos não devem ser projetadas para suportar galgamentos, e, por isso, manter os requisitos de borda livre é um objetivo crítico de desempenho nessas instalações.

A correta estimativa da borda livre é, portanto, um parâmetro estrutural essencial para a prevenção do galgamento (Ozbahceci; Bilyay, 2018; Tessema, 2020), e encontrar a borda livre apropriada é um tema de pesquisa fundamental para barragens construídas com diferentes finalidades, sob diferentes condições (Tessema et al., 2017).

O USACE (1962) explicitou que muitos métodos de cálculo e critérios básicos de borda livre consideram aproximações e incertezas, e o estabelecimento de um valor fixo para a borda livre pode causar problemas de segurança e aumentar os custos em projetos de barragens. Embora o aumento da borda livre seja fundamental para a segurança das barragens, ele também gera consideráveis custos de construção, uma vez que incrementos na altura da borda exigem

camadas adicionais na base da barragem (USACE, 1962; Tessema, et al., 2017). Assim, o desafio é evitar tanto o excesso de conservadorismo quanto alturas insuficientes, equilibrando segurança e custo.

Diante desse cenário, e constatada a importância da borda livre na segurança de barragens, observou-se uma necessidade de fazer um estudo aprofundado sobre os aspectos que envolvem o dimensionamento da borda livre. O ponto de partida deste estudo foi observar os principais órgãos nacionais e internacionais que apresentam diretrizes sobre dimensionamento de barragens.

No Brasil, o dimensionamento de barragens é regulamentado por diferentes órgãos de acordo com a finalidade da estrutura: a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), a Agência Nacional de Mineração (ANM) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Cabe investigar se esses órgãos apresentam divergências nos critérios para o cálculo da borda livre ou se adotam referências comuns, independentemente do tipo de barragem. Em âmbito internacional, diretrizes importantes são fornecidas pelo U.S. Army Corps of Engineers (USACE) e pelo U.S. Bureau of Reclamation (USBR), que oferecem parâmetros amplamente utilizados na construção de barragens. Além disso, a International Commission on Large Dams (ICOLD) é uma referência essencial, por ser uma organização global que define diretrizes e padrões técnicos, influenciando práticas de segurança e dimensionamento de barragens em diversos países.

Questões como a origem dos estudos sobre borda livre, os principais fatores que influenciam sua definição em barragens de terra e a evolução dessas práticas ao longo do tempo tornam-se fundamentais para um entendimento mais amplo da área. Além disso, é essencial identificar as metodologias de cálculo de borda livre mais utilizadas atualmente e compreender como essas metodologias variam conforme o tipo de barragem e o cenário climático. Essas perguntas visam esclarecer se as práticas tradicionais de cálculo de borda livre são adequadas para os novos padrões climáticos, e guiam esta revisão sistemática que busca sintetizar e analisar criticamente o conhecimento existente.

Até o presente, nenhuma revisão sistemática foi feita com a finalidade de analisar os estudos sobre borda livre de barragem com as metodologias de cálculo e os principais fatores que influenciam na sua definição. Com o intuito de preencher esta lacuna do conhecimento, o objetivo deste estudo foi reunir, sintetizar e avaliar criticamente todas as evidências relevantes sobre borda livre de barragem encontradas na literatura nacional e internacional. Reunindo o conhecimento existente é possível identificar lacunas, destacar tendências, e assim apresentar diferentes perspectivas, contribuindo para o avanço do campo de pesquisa.

2.2 Metodologia

Este estudo foi conduzido como uma revisão sistemática, buscando consolidar e analisar criticamente as evidências existentes sobre o dimensionamento da borda livre em barragens. A escolha pela revisão sistemática foi motivada pela necessidade de reunir estudos fragmentados sobre o tema e identificar padrões, lacunas e diretrizes aplicáveis ao dimensionamento de borda livre em diferentes contextos.

Esta revisão foi conduzida com base nas diretrizes PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), especificamente o diagrama de fluxo PRISMA 2020 (Page et al., 2021) para novas revisões sistemáticas, que incluem pesquisas em bancos de dados, registros e outras fontes. Este método garante transparência e rigor na seleção, extração e análise dos dados.

2.2.1 Definição das palavras-chave

A fim de certificar-se de que todos os artigos e documentos importantes, ou que possam ter algum impacto na conclusão sejam incluídos, a busca teve início com a definição de termos ou palavras-chave. Os termos gerais mais importantes usados nas buscas foram “segurança de barragem” e “diretrizes para dimensionamento de barragens”. Essas palavras-chave foram inseridas na busca separadamente, não houve a combinação de termos através de operadores booleanos.

A partir dos resultados dessas buscas, foi pesquisada a palavra-chave “borda livre” dentro de cada documento encontrado, com a ferramenta “localizar e editar” do Google Chrome, para que as informações relevantes a este estudo fossem identificadas. Da mesma maneira que a busca foi conduzida em português, ela também foi realizada usando os termos respectivos em inglês: “dam safety”, “guidelines for dam design” e “freeboard”.

Para encontrar informações sobre borda livre em barragens de mineração, os termos utilizados para a busca foram “construção de barragem de mineração”, e os termos em inglês “mining dam” e “mining tailings dam”. Essa abordagem resultou em uma investigação mais minuciosa e abrangente do tema.

2.2.2 Estratégias de busca

Em seguida foram estabelecidas as estratégias de pesquisa, incluindo a definição das bases de dados e de outras fontes de informações a serem consultadas. Dentro dessas estratégias, o estudo procurou informações sobre diferentes aspectos da borda livre, abrangendo as diversas finalidades da barragem, como armazenamento de água, geração hidrelétrica e contenção de rejeitos.

Não houve restrições quanto ao tipo de material, ou seja, foram considerados tanto artigos científicos como livros, diretrizes governamentais, leis, instrumentos normativos, teses, dissertações, monografias, entre outros estudos que abordassem o tema em questão.

Quanto à localização, a prioridade do estudo foi encontrar o máximo de informações possíveis sobre o dimensionamento da borda livre no Brasil, e logo em seguida a busca foi expandida para o âmbito internacional, restringindo apenas o idioma às línguas inglês e português.

2.2.3 Busca geral

A busca foi feita em maior parte no motor de pesquisa livre do Google.

2.2.4 Repositórios de literatura científica

Foi utilizado o mecanismo Google Scholar, por possuir dados da literatura acadêmica em uma extensa variedade de formatos de publicação. Ainda, a busca foi feita no portal de periódicos da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), e na base de dados multidisciplinar Web of Science.

2.2.5 Documentos de instituições relevantes

Outra base de dados utilizada no estudo foi a biblioteca do USACE, pela sua longa trajetória de expertise e conhecimento aprofundado em engenharia. Também foi feita uma busca na biblioteca de boletins da ICOLD, pela sua grande influência nos requisitos para construção de barragens.

2.2.6 Avaliação da qualidade dos estudos

A avaliação da qualidade dos estudos inclui elementos tais como o processo de seleção dos estudos, a definição dos critérios de inclusão e exclusão, e a justificativa das bases de dados selecionadas. Os estudos foram selecionados pela leitura de títulos e resumos, e os artigos pré-selecionados foram avaliados na íntegra através da leitura completa dos seus escopos. Esse processo de triagem foi realizado manualmente sem auxílio de softwares.

Os critérios utilizados para selecionar os estudos foram: o tipo de barragem, o tipo de documento e a relevância temática. Quanto ao tipo de barragem, foram considerados estudos apenas sobre as barragens de terra, visto que as tolerâncias de borda livre para barragens de concreto podem ser menos conservadoras devido à sua maior resistência. Quanto ao tipo de documento, aplicou-se o mesmo critério das estratégias de busca, ou seja, foram considerados tanto artigos científicos como livros, diretrizes governamentais, leis, instrumentos normativos, teses, dissertações, monografias, entre outros estudos que abordassem o tema em questão. Quanto à relevância do tema, foram incluídos estudos que abordam o cálculo da borda livre em barragens, ou pelo menos apresentam uma definição completa e detalhada.

Por outro lado, foram excluídos estudos irrelevantes ou incompletos, estudos com metodologia deficiente (que não apresentam nenhuma das questões desta pesquisa), documentos com acesso restrito, e duplicatas identificadas em diferentes bases de dados. As bases de dados selecionadas foram preferidas pois são reconhecidas pela comunidade científica, com boa cobertura temática e atualização regular.

2.2.7 Síntese dos resultados

Os resultados da pesquisa estão estruturados de acordo com os critérios de análise considerados importantes, constando os estudos encontrados que foram selecionados. Desses, são apresentadas as definições encontradas e a síntese das principais metodologias de cálculo. Assim, a partir da análise dos materiais pesquisados, a discussão será feita sobre os seguintes aspectos:

1. Origem do conceito;
2. O conceito de borda livre;
3. Fatores de influência considerados no dimensionamento; e
4. Metodologias de cálculo.

2.3 Resultados

2.3.1 Estudos encontrados

Foram incluídos neste artigo 29 trabalhos entre artigos científicos, memoriais técnicos, normas e diretrizes governamentais. Devido à pouca publicação sobre o tema específico, a maioria dos estudos selecionados pertencem à literatura cinza, ou seja, são informações geradas e divulgadas fora dos canais convencionais de publicação e divulgação acadêmica.

2.3.2 Literatura cinza

O quadro 1 abaixo apresenta os trabalhos selecionados para o estudo que fazem parte da literatura cinza, isto é, são manuais, diretrizes, normas técnicas, e memoriais técnicos que tratam da conceituação e/ou dimensionamento da borda livre da barragem. São fontes nacionais e internacionais, e estão organizadas em ordem crescente por ano de publicação.

Quadro 1 - Trabalhos encontrados na literatura cinza.

| Título do documento | Publicado por | País | Ano de Publicação |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------|--------------------------|
| Waves in inland reservoirs | U.S Army Corps of Engineers | EUA | 1962 |
| Technical Dictionary on Dams | International Commission on Large Dams | França | 1978 |
| Recommended guidelines for safety inspection of dams | U.S Army Corps of Engineers | EUA | 1979 |
| Freeboard criteria and guidelines for computing freeboard allowances for storage dams | U.S. Bureau of Reclamation | EUA | 1981 |
| Bulletin nº 45 – Manual on tailing dams and dumps | International Commission on Large Dams | França | 1982 |
| Guidelines on freeboard for dams | South African National Committee on Large Dams | África do Sul | 1990 |
| Inflow design floods for dams and reservoirs | U.S Army Corps of Engineers | EUA | 1991 |
| Freeboard criteria and guidelines for computing freeboard allowances for storage dams | U.S. Bureau of Reclamation | EUA | 1992 |
| Freeboard requirements in embankment dams – Guidelines | Bureau of Indian Standards | Índia | 1993 |

| | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------|------|
| Hydrologic Engineering Requirements for reservoirs | U.S Army Corps of Engineers | EUA | 1997 |
| Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas | Eletrobras | Brasil | 1999 |
| Guidelines on the safe design and operating standards for tailings storage | Department of Minerals and Energy | Austrália | 1999 |
| Crerios de projeto civil de usinas hidrelétricas | Eletrobras | Brasil | 2003 |
| Guidelines on acceptable flood capacity for dams | Department of Natural Resources and Water | Austrália | 2007 |
| Bulletin nº 157 – Small dams: design, surveillance and rehabilitation | International Commission on Large Dams | França | 2011 |
| Guidelines on freeboard for dams | South African National Committee on Large Dams | África do Sul | 2011 |
| Design standards nº 13 – Embankment dams | U.S. Bureau of Reclamation | EUA | 2012 |
| Diretrizes para a elaboração de projetos de barragens | Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico | Brasil | 2016 |
| Guia prático de pequenas barragens | Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico | Brasil | 2016 |
| NBR 13.028 – Mineração: elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos | Associação Brasileira de Normas Técnicas | Brasil | 2017 |
| Hydrologic Engineering Requirements for reservoirs | U.S Army Corps of Engineers | EUA | 2018 |
| Guidelines on Tailing Dams | Australian National Committee on Large Dams | Austrália | 2019 |
| Analysis and Design Aspects of Embankment Dams | Central Water Commission | Índia | 2019 |
| Resolução ANM nº 95 | Agência Nacional de Mineração | Brasil | 2022 |

Fonte: elaborado pela autora.

2.3.3 *Literatura acadêmica*

A busca feita no portal de periódicos da CAPES revelou que o termo “freeboard” relacionado à barragem apareceu em 9 títulos de artigos, mas apenas 2 desses possuem acesso aberto. A busca também foi feita com o termo em português. Repetindo a mesma busca no

banco de dados Web of Science, 4 artigos foram encontrados contendo “freeboard” no título, entretanto, todos com acesso restrito.

Dos artigos acessíveis, nenhum foi incluído neste estudo, pois seus conteúdos não correspondem ao foco principal. O objetivo deste trabalho é explorar as definições e metodologias de cálculo da borda livre, e os artigos encontrados não abordam essas questões de maneira explícita.

A literatura acadêmica que foi incluída nesse estudo foi encontrada através do motor de pesquisa livre do Google e na base de dados Google Scholar. O quadro 2 abaixo apresenta os trabalhos acadêmicos que foram selecionados.

Quadro 2 - Trabalhos encontrados dentro da literatura acadêmica.

| Título | Autor(es) | Origem | Ano de publicação |
|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------|--------------------------|
| Am I underestimating or overestimating my dam freeboard design? | Carmen E. Bernedo; Lori L. Hadley; John C. Haapala | EUA | 2008 |
| Barragem de rejeitos | Soares, Lindolfo | Brasil | 2010 |
| Freeboard Allowance at rivers – experiences from Germany | Pohl, R. | Alemanha | 2014 |
| A definition of freeboard | Quelopana, Hugo; Barrera, Sergio | Chile | 2015 |
| Physical modelling of dam overtopping from landslide generated waves | Tessema, Netsanet Nigatu | Etiópia | 2020 |

Fonte: elaborado pela autora.

2.3.4 Definições encontradas

A partir dos resultados encontrados, as definições mais relevantes de borda livre estão expostas no quadro 3 a seguir. A relevância é dada pela completude da definição, sintetizada para cada fonte encontrada.

Quadro 3 - Síntese das definições mais relevantes encontradas.

| Fontes relevantes | Definição de borda livre |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| U.S Army Corps of Engineers | distância vertical entre a crista de uma barragem e algum nível específico do reservatório, geralmente o nível normal de operação ou o nível máximo de inundação. |
| U.S. Bureau of Reclamation | borda livre normal: diferença de cota entre o topo da barragem sem curvatura e o nível de água de armazenamento normal; e |

| | |
|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | borda livre mínima: aquela calculada entre o topo da barragem e a superfície máxima de água do reservatório que resultaria da IDF. |
| International Commission on Large Dams | borda livre normal: distância vertical da elevação da crista da barragem à elevação normal da superfície da água do reservatório em operação; e borda livre mínima: distância vertical da elevação da crista da barragem à elevação máxima da superfície da água do reservatório durante a cheia de projeto com operação do vertedor. |
| South African National Committee on Large Dams | distância vertical entre o nível normal máximo de abastecimento e o topo da barragem sem extravasamento, excluindo a curvatura, mas incluindo paraquitos adequadamente projetados e barreiras contra ondas que se elevam acima do topo. |
| Bureau of Indian Standards | distância vertical entre a crista do aterro (excluindo a curvatura) e a superfície da água parada do reservatório, onde a borda livre normal considera o nível cheio do reservatório, e a borda livre mínima considera o nível máximo de água calculado para a enchente projetada. |
| Eletrobras | borda livre normal: distância vertical entre o nível máximo normal no reservatório e a cota de galgamento da barragem; e borda livre mínima: distância vertical entre o nível de máxima enchente no reservatório e a cota de galgamento da barragem. |
| Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico | borda livre normal: tem sido definida como a diferença entre a cota da crista e o nível máximo normal do reservatório borda livre mínima: diferença entre a cota da crista e o nível de máxima cheia, ou nível maximum maximorum. |
| Associação Brasileira de Normas Técnicas | altura livre entre o nível de água <i>maximum maximorum</i> calculado pelo modelo hidrológico e a elevação de coroamento da barragem, durante a cheia de projeto.” |
| Australian National Committee on Large Dams | borda livre total em uma barragem de rejeitos: distância vertical entre o nível máximo operacional da lagoa de rejeitos e a crista da barragem, considerando armazenamento para tempestades extremas, descarga do vertedouro, borda livre para ondas e bordas livres de contingência. |
| Pohl, R. | distância medida verticalmente entre o nível de água projetado e o topo do dique ou muro de contenção. |
| Quelopana, Hugo; Barrera, Sergio | A borda livre total em uma barragem de rejeitos deve ser distinguida quanto ao projeto e a operação em: borda livre de projeto hidráulico, de projeto de rejeitos, a borda livre de operação hidráulica e de operação de rejeitos. |
| Carmen E. Bernedo; Lori L. Hadley; John C. Haapala | borda livre normal: diferença de elevação entre o topo da barragem e a elevação máxima normal do nível da água. |

| | |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | borda livre mínima: diferença na elevação entre o topo da barragem e a superfície máxima da água no reservatório que resultaria da IDF. |
| Tessema, Netsanet Nigatu | distância vertical entre a superfície da água e o topo da barragem. |
| Soares, Lindolfo | distância vertical entre o topo do aterro e o nível d'água. |

Fonte: elaborado pela autora.

2.3.5 Principais metodologias de dimensionamento

O quadro a seguir apresenta a síntese das metodologias de cálculo da borda livre segundo as diferentes fontes encontradas neste estudo. É importante destacar que as fontes internacionais mais relevantes sobre o tema, segundo o que foi observado neste estudo, são o USACE e o USBR, ambas americanas. Nacionalmente, as fontes relevantes são a agência reguladora ANA e a empresa de capital aberto Eletrobras. A ANEEL e a ANM desempenham um papel fundamental na segurança de barragens nacional, entretanto não foram encontradas informações suficientes sobre a borda livre nessas fontes.

Como algumas fontes possuem mais de um estudo publicado, a tabela mostra apenas o que foi consolidado, em síntese, no estudo mais atualizado da fonte em relação a este artigo. No quadro estão expostos os fatores que influenciam no cálculo da borda livre com as respectivas referências adotadas por cada autor, os valores mínimos de referência que eles consideram, e o cálculo utilizado.

Quadro 4 - Síntese das metodologias de cálculo da borda livre (BL).

| Fonte | Fatores de influência | Referências | Borda livre mínima recomendada | Metodologia de cálculo |
|----------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------|
| USACE (2018) | S^1, F^1, R^2, D^3 , relação entre t_{\min}^3 e H_s^3 . | ¹ Saville (1954) ² USACE EM 1110-2-1100 (2008) ³ Ábacos USACE (1989) | - | $BL = R_{2\%} + S$ |
| USBR (2012) | $S^1, F^1, H_s^2, R^2, D^2, t_{\min}^3, e T^3$. | ¹ Saville (1954) ² USBR (1981); USACE (1976) ³ USBR (1992) | $BL \geq 1,0m$ ou o calculado, o que for maior | $BL = R + S_{10\%}$ |
| ICOLD (2011) | $S^1, F^1, H_s^2, R^2, D^2, e t_{\min}^2$. | ¹ USACE EM 1110-2-1100 (2006) ² USBR (1992) | $BL \geq 1,0m$ | $BL = R + S$ |
| SANCOLD (2011) | $S^{12}, F^2, H_s^2, R^2, t_{\min}^2, T^2$, seiches e surtos devido | ¹ USACE EM 1110-2-1100 (2006) ² The Rock Manual (2007) | $0,5 \leq BL \leq 1,5m$, depende da | - |

| | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---|
| | a terremotos ³ e a deslizamentos de terra ⁴ . | ³ Dean e Dalrymple (1992) ⁴ Huber e Hager (1997) | categoria de risco | |
| ANA (2016) | S ¹ , F ¹ , H _s ³ , R ² , T ³ , ondas geradas por sismos ⁴ . | ¹ USBR (1992) ² MEER e JANSSEN (1994) ³ MARTINS (2002) ⁴ CINS (1968) | $BL \geq 1,0m$ | - |
| ANM (2022) | - | - | $BL \geq 1,0m$ ou o calculado, o que for maior | - |
| Eletrobras (2003) | S, F e D. ¹² | ¹ Saville, McClendon e Cochran (1962) ² USBR (1992) | $BL \geq 1,0m$ | - |
| Legenda: BL = borda livre S = elevação do vento S _{10%} = elevação do vento excedido por 10% dos ventos incidentes F = fetch H _s = altura significativa da onda | | R = avanço das ondas R _{2%} = elevação máxima da onda excedido por 2% das ondas incidentes D = profundidade do reservatório ao longo da linha do fetch t _{min} = duração mínima dos ventos T = período (-) informação não encontrada na bibliografia consultada. | | |

Fonte: elaborado pela autora.

2.4 Discussões

A partir dos resultados apresentados, pode-se analisar os estudos encontrados de acordo com os critérios definidos a princípio. Nos quadros 1 e 2, que reúnem os trabalhos selecionados, observa-se que a quantidade de estudos não é tão significativa, apesar da importância do estudo da borda livre para a segurança de barragem. De todos os 29 estudos encontrados na literatura cinza e na literatura acadêmica, 5 desses foram publicados pelo U.S. Army Corps of Engineers e 3 pelo U.S. Bureau of Reclamation, evidenciando o protagonismo dos dois órgãos no tempo.

Em relação à definição, no quadro 3 é possível observar que o conceito de borda livre mínima estabelecido pelo USBR influenciou o ICOLD, e no Brasil, ANA e Eletrobras. Contudo, há algumas diferenças na conceituação das outras fontes em relação ao nível da água ao qual deve ser adotada como referência.

Em relação à metodologia, a grande maioria adota USACE e USBR como fontes de conhecimento. O quadro 4 aborda, de forma concisa, a consolidação dos estudos mais relevantes para este artigo.

Apesar de o USACE não recomendar valores mínimos de referência, o USBR recomenda como borda livre mínima 3 pés (aproximadamente 1,0 metro), outras fontes utilizam a mesma recomendação. Inclusive no Brasil, o valor de 1,0 m para borda livre mínima é adotado pela ANA, ANM e Eletrobrás. As fórmulas apresentadas diferem em algumas fontes, mas a maioria segue as diretrizes do manual USACE EM 1110-2-1100, que foi atualizado ao longo dos anos, e do USBR (1981, 1992). O modelo de cálculo para encontrar o *fetch* efetivo dado por Saville (1954) foi considerado pelas fontes relevantes, ou modificado, mas mantendo o princípio original.

Os tópicos a seguir apresentam uma discussão detalhada sobre os resultados encontrados na pesquisa, desde a origem do conceito datada na literatura, as definições, até os modelos de cálculo encontrados na literatura mais atualizada.

2.4.1 A origem do conceito de borda livre

A definição da borda livre de uma barragem surgiu a partir dos estudos de ondas em reservatórios, isto é, em águas com limites definidos. Entretanto, os primeiros estudos e recomendações na determinação da altura de ondas surgiram da necessidade de prever as ondas do mar em invasões de guerra planejadas pelos Estados Unidos a partir de 1942 (Sverdrup; Munk, 1947). Com o passar dos anos, reconheceu-se que as relações estabelecidas para ondas, ação das ondas e configuração do vento desenvolvidas a partir de estudos oceânicos em grande escala não necessariamente poderiam ser aplicáveis para corpos d'água interiores (USACE, 1962).

Em um artigo elaborado para o USACE, Saville (1952) desenvolveu o primeiro estudo da configuração do vento e da ação das ondas em águas interiores, para um programa geral de controle de enchentes. Em Saville (1954), foi introduzido um método para avaliar o efeito da largura do *fetch* na previsão de ondas em águas de reservatórios interiores. De acordo com os estudos de Saville (1952, 1954), *fetch* se refere à extensão da superfície da água sobre a qual o vento atua para gerar ondas, sem obstruções significativas.

A partir desses estudos, a estimativa da altura máxima das ondas, relacionada à intensidade dos ventos, foi sendo aplicada no dimensionamento da borda livre da barragem para uso nos projetos de reservatórios. Assim, o conceito de borda livre surgiu nos estudos do *Beach*

Erosion Board n° 132 para o USACE (1962) como “cota de referência de borda livre”, e se referia à distância vertical do nível normal de operação da barragem até seu topo, enquanto outros casos consideravam a borda livre sendo medida a partir da cota máxima de água que pode ser atingida pela enchente projetada para o vertedouro (Saville; McClendon; Cochran, 1962).

Em todos os casos, a “cota de referência de borda livre” se aplicaria ao nível da água que existiria se não houvesse ação das ondas, mas a magnitude desse comprimento necessário para garantir uma estrutura segura depende das características das ondas esperadas coincidentemente com o nível máximo ou quase máximo do reservatório (USACE, 1962).

A partir desse conceito primordialmente definido, o USACE (1979) publicou as diretrizes para inspeção de segurança de barragens, onde defende que cada projeto específico deve avaliar os parâmetros críticos necessários para a determinação do limite mínimo da borda livre, pois existem muitos fatores envolvidos em tais determinações.

Posteriormente, foram desenvolvidos critérios e procedimentos para cada aspecto envolvido nas diretrizes da borda livre (USACE, 1997). O manual USACE (1986) fornece orientações para previsão de ventos associados a tempestades e estimativa do aumento total do nível da água em áreas costeiras, e no manual USACE (1989) são fornecidas as diretrizes para obter, interpretar e aplicar informações sobre o nível da água e as ondas.

2.4.2 O conceito de borda livre

De acordo com os estudos analisados, pode-se assumir que o conceito de borda livre original foi definido pelo USACE, e mantido ao longo dos anos como sendo a distância vertical entre a crista de uma barragem e algum nível específico do reservatório, geralmente o nível normal de operação ou o nível máximo de inundação (USACE, 1979, 1991, 1997, 2018).

O *U.S. Bureau of Reclamation* (USBR), agência federal que se concentra na gestão dos recursos hídricos dos EUA, aplica o mesmo conceito de borda livre definido pelo USACE. Entretanto, no USBR (1981) a definição é dividida entre borda livre normal como sendo a diferença de cota entre o topo da barragem sem curvatura e o nível de água de armazenamento normal, e a borda livre mínima, aquela calculada entre o topo da barragem e a superfície máxima de água do reservatório que resultaria da IDF (enchente crítica de projeto).

Analisando a biblioteca de boletins do ICOLD disponível no site oficial, desde o início das publicações na década de 60, o primeiro boletim sobre segurança de barragem foi o nº 59 (1987), e nele não há definição de borda livre. Entretanto, o dicionário técnico de

barragens de 1978 definia borda livre como a distância vertical entre o nível de água medido e o topo da própria barragem (ICOLD, 1978). De acordo com ICOLD (1978), havia tipos diferentes de borda livre: borda livre líquida (ou seca, ou de inundação), que considerava o máximo nível da água, e a borda livre bruta (ou total), que levava em conta o nível de retenção da água. Já no boletim nº 157, o ICOLD (2011) fornece a mesma definição de borda livre dada pelo USBR (1981).

No Brasil, a Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobras) foi pioneira na segurança de barragens nacional (Eletrobras, 2022). Nos manuais e diretrizes de estudos e projetos da Eletrobrás (1999), é apresentado o conceito brasileiro de borda livre como sendo uma “folga” entre a crista da barragem e o nível de água prevista para ser liberada pelo vertedouro. Seu estudo sobre critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas define a borda livre mínima e a borda livre normal, assim como na definição do USBR (1981), entretanto a cota limite da barragem é nomeada cota de galgamento (Eletrobras, 2003).

A Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA), criada em 2000, é uma agência reguladora vinculada ao Governo Federal que é responsável pela fiscalização da segurança de barragens em rios nacionais. A ANA possui um conjunto de oito manuais com orientações úteis aos empreendedores de barragens, onde define a borda livre mínima como a distância vertical entre o nível máximo *maximorum* da água e o coroamento da barragem, não considerando o parapeito (ANA, 2016a). O termo máximo *maximorum* indica o máximo nível do reservatório a partir do qual abrem-se os vertedouros para a passagem de cheias. Em ANA (2016b) a borda livre normal é definida de acordo com o ICOLD (1978).

A Agência Nacional de Mineração (ANM) publicou em 2022 a resolução nº 95 que cita a falta da borda livre da barragem como um dos critérios que enquadra uma barragem na categoria de risco alta. Não foi encontrada nenhuma definição de borda livre ou critérios de dimensionamento relativos à ANM. A ANEEL é a entidade responsável por realizar a fiscalização da segurança de barragens destinadas a geração hidrelétrica. A busca feita nesta pesquisa não encontrou nenhuma resolução normativa ou diretriz da ANEEL que abordasse a borda livre da barragem.

Analisando os resultados encontrados de outros países, o *South African Committee on Large Dams* (SANCOLD, 1990) define a borda livre total de uma barragem como a distância vertical entre o nível normal máximo de abastecimento e o topo da barragem sem extravasamento, excluindo a curvatura, mas incluindo parapeitos adequadamente projetados e barreiras contra ondas que se elevam acima do topo. Esse conceito foi revisto em SANCOLD (2011) e a definição permaneceu a mesma.

O *Bureau of Indian Standards* (1993) define a borda livre como a distância vertical entre a crista do aterro (excluindo a curvatura) e a superfície da água parada do reservatório, onde a normal considera o nível cheio do reservatório, e a mínima considera o nível máximo de água calculado para a enchente projetada. Nos aspectos de análises e projetos de barragens de aterro, o conceito de borda livre permanece o mesmo (Central Water Commission, 2019). Na Alemanha, considera-se a distância vertical entre o topo da estrutura de contenção e o nível máximo de armazenamento (Pohl, 2014). A Austrália, em geral, considera o mesmo conceito definido pelo ICOLD (1978) (NRW, 2007).

Na segurança de barragens de contenção de rejeitos de mineração, o ICOLD (1982) e o ICOLD (1989) foram os primeiros documentos a citar a borda livre nesse contexto. A especificação do conceito apresentada em ICOLD (1982) definiu-a apenas como a altura entre o nível da água e a crista do aterro. A Austrália Ocidental foi pioneira nesse quesito por definir bordas livres específicas para barragens de rejeito, estabelecendo três tipos de borda livre: total, operacional, e de praia (DME, 1999). Como afirmado por Szymanski e Davies (2004), até então a maioria das diretrizes de segurança de barragem disponíveis não levava em conta as especificidades das barragens de rejeito.

O ANCOLD (2019) apresenta a borda livre total em uma barragem de rejeitos como a distância vertical entre o nível máximo operacional da lagoa de rejeitos e a crista da barragem, considerando armazenamento para tempestades extremas, descarga do vertedouro, borda livre para ondas e bordas livres de contingência. Quelopana e Barrera (2015) definiram em seu trabalho que a borda livre focada na operação de um reservatório de rejeitos é mais importante que uma definição na fase de projeto, com isso eles estabeleceram a borda livre de projeto hidráulico, de projeto de rejeitos, a borda livre de operação hidráulica e de operação de rejeitos.

No Brasil, a primeira edição da NBR 13028 não apresenta o conceito de borda livre (ABNT, 1993), porém, na sua terceira edição com os requisitos de elaboração e apresentação de projetos de barragens para contenção de rejeitos, a borda livre é estabelecida pelo mesmo conceito dado pela ANA (2016a) (ABNT, 2017). A Vale S.A. é uma mineradora multinacional brasileira e uma das maiores empresas de mineração do mundo, e não cita a borda livre de barragem em seu manual de barragens e estrutura de armazenamento de rejeitos (Vale, 2024).

A Agência Nacional de Mineração (ANM), responsável pela fiscalização de barragens de mineração no Brasil, não apresenta definição de borda livre de barragens, apenas apresentou a falta da borda livre como um dos critérios que enquadram uma barragem na categoria de risco alta (ANM, 2022). Como requisito, a ANM (2022) diz que a borda livre mínima deve ser maior ou igual a 1,0m, ou conforme projeto, o que for maior.

Outros autores também estabeleceram suas definições de borda livre, como Soares (2010) em seu livro sobre barragem de rejeitos descreveu a borda livre simplesmente como a distância vertical entre o nível da água e o topo do aterro. (Bernedo et al., 2008) apresentam as definições dadas pelo USACE (1991,1997) e USBR (1992). Em um estudo sobre a relação entre a borda livre e o volume galgado pela barragem, Tesema (2020) dá a mesma definição simples que Soares (2010) e estabelece a borda livre como um dos parâmetros dominantes que influencia no volume de galgamento.

2.4.3 Fatores de influência considerados no dimensionamento

O EM 1110-2-1420 (USACE, 1997, 2018) fornece informações sobre estudos de engenharia hidrológica para projetos de reservatórios. De acordo com o USACE (1997), a determinação da borda livre geralmente se baseia nas condições máximas prováveis de vento e no nível normal de operação do reservatório, pois é considerado improvável que o nível máximo provável do reservatório seja atingido simultaneamente a condições máximas de vento. Entretanto, na versão mais atual do manual a determinação se baseia nas características prováveis do vento suscetíveis de acontecer simultaneamente a um evento de cheia máxima (USACE, 2018). Em ambas as edições, os fatores considerados são a característica das ondas, a configuração do vento e o avanço das ondas, entre outros aspectos como *fetch* efetivo, e as relações entre a duração dos ventos e altura das ondas (USACE, 1997, 2018).

Os fatores considerados pelo USBR (1981) são a altura, configuração e avanço das ondas geradas pelo vento e geradas por terremotos, e deslizamentos de terra; assentamento do aterro e da fundação; incerteza hidrológica e mau funcionamento dos vertedouros. A revisão de 1992 ainda considera os mesmos fatores (USBR, 1992). Apesar de abordar as incertezas hidrológicas (cálculo da cheia máxima), o USBR (1981, 1992) assim como USACE (1997) considera improvável que ocorram ventos máximos quando houver eventos de cheia máxima. Portanto, segundo essas fontes, a borda livre deve ser calculada de acordo com o conjunto dos fatores que tenham probabilidade de ocorrer simultaneamente.

O ICOLD (2011) assume que o projeto da borda livre resulta da mesma combinação de fatores citados pelo USBR (1992), e concorda que quando a borda livre for dimensionada considerando o nível máximo de cheia do reservatório, condições de vento menores podem ser adotadas. A Eletrobrás (1999) considera os mesmos fatores. A ANA (2016b) por sua vez divide os fatores de influência para o cálculo da borda livre entre quantificáveis (regime de ventos,

fetch, tipo de barragem, sismicidade da região) e não quantificáveis (grau de conhecimento das condições hidrológicas, por exemplo).

A SANCOLD (1990) define que a borda livre é composta por dois componentes, sendo a sobrecarga de inundação acima do nível máximo de abastecimento o componente primário, e o componente secundário que aborda os efeitos de ventos e ondas. As diretrizes de borda livre de barragem da SANCOLD (2011) mantêm os componentes de contribuição de borda livre definidos em SANCOLD (1990), mas explica os mecanismos de condução de cada componente, isto é, os processos físicos ou fatores que influenciam cada componente. Os principais componentes, não cumulativos, para o cálculo da borda livre total são: sobrecarga de inundação, configuração do vento, avanço das ondas, seiches sísmicos, ondas induzidas por terremotos e deslizamentos de terra, abertura ou fechamento de vertedouros (SANCOLD, 2011).

Os fatores considerados na estimativa de borda livre do *Indian Standart* (1993) são as características das ondas (altura e comprimento), configuração do vento acima do nível de água adotado como cota de referência, inclinação do talude da barragem e rugosidade do revestimento. Esta norma indiana não leva em conta os efeitos de terremoto, assentamento, ou seiches sísmicos. Nos aspectos de análises e projetos de barragens de aterro, os fatores permanecem os mesmos (Government of India, 2019).

As diretrizes australianas dizem que a magnitude da borda livre depende da resistência da barragem às ondas e galgamento, da direção e magnitude dos ventos, *fetch* efetivo das ondas geradas pelo vento, profundidade do armazenamento, da probabilidade da coincidência de altos níveis de inundação com ventos fortes, e do potencial recalque da crista da barragem (NRW, 2007).

Nas diretrizes de barragens de mineração pesquisadas, não foram encontradas especificações sobre fatores de influência no cálculo de borda livre para barragem de contenção de rejeitos. As normas internacionais de borda livre priorizam os aspectos hidráulicos, mas subestimam o nível dos rejeitos, assumindo que seu depósito segue um padrão de crescimento sem grandes variações impactantes, tanto no aspecto de design quanto operacional (Quelopana, [S.d.]).

2.4.4 Metodologias de cálculo da borda livre

Os estudos do *Beach Erosion Board n° 132* (USACE, 1962) foram precursores no desenvolvimento de metodologias para cálculo da borda livre. O método aplicado pelo corpo

de engenheiros utiliza as relações de previsão de onda de Sverdrup–Munk com as revisões de Bretschneider, através de gráficos adimensionais que relacionam altura e períodos de ondas com a velocidade do vento e os comprimentos de *fetch*. Esse método foi desenvolvido a partir de um estudo de campo realizado nos reservatórios de Fort Peck e Denison, e os dados da análise consistiram em registros da superfície da água, e registros contínuos de velocidade e direção do vento.

Foi considerado que as velocidades do vento medidas são aumentadas à medida que o vento sai da área terrestre e atravessa a água, pois as velocidades de vento sobre a água são maiores (em 130% de acordo com o estudo). O método desenvolvido para obter os comprimentos de *fetch* consiste em construir 15 radiais a partir da estação de ondas em intervalos de 6° (até um ângulo de 45° em ambos os lados da direção do vento) e estender essas radiais até intersectarem a linha costeira. O componente de comprimento de cada radial em direção paralela à direção do vento é medido e multiplicado pelo cosseno do ângulo entre a radial respectiva e a direção do vento. Os valores resultantes para cada radial são somados e divididos pela soma dos cossenos de todos os ângulos individuais, conforme a equação:

$$F = \frac{\sum x_i \cos \alpha_i}{\sum \cos \alpha_i} \quad (1)$$

Esse método de cálculo do *fetch* foi apresentado a primeira vez no *Beach Erosion Board n° 70* por Saville (1954). Outra grande contribuição feita por esse estudo foi a aceitação geral da fórmula da elevação do vento (*wind set-up*), que é o acúmulo de água na extremidade da direção do vento causada pelo estresse horizontal que o vento exerce sobre a superfície da água. Na equação 2 abaixo, S é a elevação do vento, U é a velocidade do vento, D é a profundidade média do lago, e F é o *fetch*.

$$S = K \frac{U^2 F}{D} N \cos \theta \quad (2)$$

N é um coeficiente de forma do reservatório que pode ser aproximado como 1,0. θ é o ângulo entre o vento e o *fetch* e o $\cos \theta$ pode ser considerado como 1,0. K é uma constante, um valor de $K=1/1400$ pode ser aceito como um bom valor médio baseado na faixa de valores propostos por diversos pesquisadores (USACE, 1962). A equação pode ser simplificada por:

$$S = \frac{U^2 F}{1400D} \quad (3)$$

Os valores obtidos pelos cálculos e considerações anteriores são comparados com os ábacos que relacionam altura e período das ondas com a profundidade do reservatório, o valor do *fetch* com a elevação do vento, e a elevação do vento com a declividade do talude da barragem. Para a análise, foram considerados dois níveis de água no reservatório: o nível normal operacional combinado com ventos máximos, e o nível máximo do reservatório que poderia ser alcançado durante a enchente projetada para a comporta combinado com ventos normais.

Para todos os efeitos, no estudo é considerado improvável que ventos maiores ocorram simultaneamente à enchente máxima. Um ábaco final entrega os valores de elevação da onda de acordo com os dados interpolados pelos ábacos anteriores. De acordo com essas elevações finais do avanço das ondas obtidas, compara-se com o nível de elevação de referência do reservatório tomado inicialmente. A partir disso, os engenheiros projetistas podem definir qual altura de borda livre seria necessária para garantir a segurança da estrutura e evitar o transbordamento.

As considerações sobre o vento e análise de ondas feitas pelo *Beach Erosion Board n° 132* (USACE, 1962) foram replicadas em diversos outros estudos, assim como o cálculo do *fetch* e da elevação do vento (equação 3). O EM 1110-2-1414 (USACE, 1989) aborda todas essas considerações e foi utilizado como referência para o manual do USACE (1997). Entretanto, a edição atualizada do USACE (2018) apresenta outra metodologia de cálculo do *fetch* efetivo a partir de nove radiais, separadas por 3 graus e abrangendo 12 graus de cada lado da linha central, criando um leque total de 24 graus. Nesse método, é necessário considerar vários *fetches* efetivos e suas velocidades do vento na análise para determinar a altura de onda mais crítica.

Para o cálculo da estimativa de borda livre, o EM 1110-2-1420 (USACE, 2018) apresenta um exemplo completo para a barragem de Fort Peck para ventos com frequência de 4, 2 e 1%, contendo 25, 50 e 100 anos de período de retorno. Os dados de velocidade e duração dos ventos para a análise são específicos do local, e são escolhidas as velocidades que se encontram na direção do maior *fetch* encontrado. Depois de selecionadas as velocidades do vento, calcula-se a profundidade média do reservatório ao longo do *fetch* efetivo, determinada a partir de várias seções transversais medidas.

A elevação do vento é calculada conforme a equação 3 e a altura significativa da onda (4) e seu período (5) são calculados de acordo com as equações do EM 1110-2-1100 (USACE, 2008). Também é definida a inclinação do talude do aterro por onde a onda passará.

$$H_s = \frac{4,13 \times 10^{-2}}{g} [0,001U^2(1,1 + 0,035U)] \times \left[\frac{gF_e}{(0,001U^2(1,1 + 0,035U))} \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$T_s = \frac{0,651}{g} [0,001(1,1 + 0,035U)U^2]^{1/2} \times \left[\frac{gF_e}{(0,001(1,1 + 0,035U)U^2)} \right]^{1/3} \quad (5)$$

O avanço das ondas (*wave run-up*) também é calculado a partir das equações do EM 1110-2-1100, como descrita na equação 7 abaixo. Na equação 6, ξ é um parâmetro de quebra de ondas, chamado *surf-similarity*. Na equação 7, A e C são coeficientes dependentes de ξ e $i\%$ (USACE, 2008). Os parâmetros γ são fatores de redução que podem ser assumidos como 1. A borda livre necessária é encontrada somando a elevação máxima da onda (nível excedido por $i=2\%$ das ondas incidentes) com a elevação do vento (S).

$$\xi = \frac{\tan \theta}{\sqrt{\frac{2\pi H_s}{gT_s^2}}} \quad (6)$$

$$\frac{R_{i\%}}{H_s} = (A\xi + C)\gamma_r\gamma_b\gamma_h\gamma_\beta \quad (7)$$

A metodologia apresentada pelo USBR (1981) segue os mesmos procedimentos do USACE (1962) com algumas modificações. No caso da falta de ventos específicos do local, o USBR apresenta mapas de isolinhas que conectam pontos de velocidades de vento iguais em intervalos de tempo específicos. Em todos os métodos apresentados, as velocidades do vento terrestre foram ajustadas para 10 metros (25 pés) acima do nível do solo. O USBR também considera um fator de majoração de 1,3 para a velocidade do vento sobre a água.

O cálculo do *fetch* efetivo é o mesmo trabalhado pelo USACE (1962), assim como as relações entre a velocidade do vento sobre a água e a duração do vento, a altura significativa da onda e o período da onda, são obtidas pelos mesmos ábacos apresentados pelo documento. Para todos os casos, a altura significativa das ondas é a média do terço mais alto das ondas no espectro de ondas. A fórmula utilizada para cálculo da elevação do vento também é igual a equação 3 explicitada anteriormente, e o cálculo do avanço da onda é feito através da fórmula simplificada a seguir:

$$R_s = \frac{H_s}{0,4 + (H_s/L)^{0,5} \cot \theta} \quad (8)$$

Em que: H_s é a altura da onda significativa, L é o comprimento da onda, e θ é o ângulo da face à montante da barragem com a linha do horizonte.

O procedimento apresentado pelo USBR (1981) calcula a borda livre mínima e a borda livre normal seguindo o mesmo método, entretanto a borda livre normal utiliza a altura significativa das ondas majorada em 1,27 e as velocidades do vento consideradas são as máximas esperadas (a milha mais rápida com 1 minuto de duração, e a velocidade de vento de verão máxima em 1 hora de duração). Por fim, a borda livre é a soma da elevação do vento com o avanço da onda.

O memorial técnico do USBR (1992) apresenta um método probabilístico, além do método convencional de 1981, para análise da borda livre em novas barragens. Esse método envolve duas etapas principais, primeiro a derivação da distribuição de probabilidade acumulada da soma de duas variáveis aleatórias independentes ($Z=X+Y$), sendo X a elevação da água durante uma enchente e Y o incremento de altura causado pelo vento. A probabilidade de excedência de uma determinada elevação da crista é expressa para um intervalo de 1 hora dentro de um ano. A segunda etapa consiste na conversão dessa probabilidade horária de excedência em uma probabilidade anual. A probabilidade é calculada usando dados de vento locais e transposta para o reservatório com fatores de ponderação para cada estação.

O fetch é calculado pelo somatório dos comprimentos das radiais, espaçados em 3° , dividido pelo número de radiais escolhido. As durações mínimas para que a velocidade do vento gere as maiores ondas são obtidas por um ábaco utilizado no EM 1110-2-1414 (USACE, 1989), assim como a altura significativa da onda. Os dados relacionados a avanço da onda e elevação do vento são calculados conforme USBR (1981).

Os dados de inundação são divididos em intervalos entre a capacidade de conservação e o nível máximo de armazenamento, considerando diferentes eventos de inundação com durações relacionadas graficamente à probabilidade anual.

Diversas probabilidades são calculadas para cada intervalo de elevação da água, combinando a probabilidade horária do vento com a do intervalo da água. A probabilidade anual do projeto é determinada para cada elevação-alvo da crista, levando em conta *runup* e *setup* gerados pelo vento, e representada graficamente. A elevação da crista que satisfaz os requisitos de borda livre é escolhida com uma probabilidade de 0,0001 recomendada para segurança.

O método probabilístico utilizado no USBR (1992) ensejou a criação de um programa computacional próprio para seus cálculos, o PFARA (Probabilistic Freeboard and Riprap Analysis), entretanto este programa não foi utilizado nos seus 20 anos de existência porque o método apresentado no USBR (2012) é mais simples e dá bons resultados segundo o autor. O USBR (2012) calcula as probabilidades de ocorrência dos ventos segundo o USBR (1992), porém a duração mínima do vento (9), altura significativa da onda (10) e o período (11) são calculados pelas fórmulas dadas.

$$t_{min} = 1,87(F^{0,67}/V^{0,34}) \quad (9)$$

Sendo F o fetch efetivo e V a velocidade do vento sobre a água.

$$H_s = 0,0245 \times F^{\frac{1}{2}} \times V(1,1 + 0,0156V)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$T = 0,464 \times F^{\frac{1}{3}} \times V^{\frac{1}{3}}(1,1 + 0,0156V)^{\frac{1}{6}} \quad (11)$$

O cálculo do avanço da onda é feito através da mesma equação 5 utilizada no USBR (1981).

Entre os boletins do ICOLD analisados, o boletim nº 157 do ICOLD (2011), que trata sobre projeto de pequenas barragens, foi o único documento que abordou o dimensionamento da borda livre. Na metodologia apresentada, o comitê concorda com os cálculos utilizados pelo USACE (1997) e USBR (1992) para elevação do vento e avanço de ondas.

O método de dimensionamento da borda livre apresentado pela SANCOLD (1990) tratava-se de uma combinação do pior cenário possível entre todos os fatores de influência considerados. Os cálculos de fetch, altura significativa da onda, duração mínima do vento, período, elevação de vento e avanço de ondas são feitos de acordo com Saville, McClendon e Cochran (1962). Na atualização das diretrizes, o SANCOLD (2011) utiliza como referência o The Rock Manual (2007) e recomenda o uso de modelos numéricos para previsão de ondas de vento, em especial o modelo SWAN (Simulating Waves Nearshore).

Os principais dados de entrada necessários para o modelo numérico SWAN de acordo com o SANCOLD (2011) são a configuração da superfície da água do reservatório, a topografia do fundo do reservatório e a velocidade e direção do vento sobre o reservatório. Os principais resultados obtidos a partir do modelo inclui altura significativa da onda, período de

pico da onda, período médio da onda e direção média da onda sobre a superfície do reservatório. A borda livre é obtida pela mesma combinação de pior cenário abordada no SANCOLD (1990).

A Eletrobrás (1999) recomenda a metodologia de cálculo do USBR para barragens com altura maior que 10 metros. A Eletrobras (2003) não apresenta metodologia de cálculo, apenas requisitos mínimos de referência baseados no trabalho de Saville, McClendon e Cochran (1962), que foi utilizado no USACE (1962).

A ANA (2016b) apresenta uma metodologia de cálculo baseada no método convencional do USBR (1992) para encontrar o fetch e a maré gerada pela ação do vento (equação 3). Para estimar a altura significativa das ondas e o seu período, a ANA recomenda as fórmulas de Martins (2002) (equação 12 e 13, respectivamente).

$$H_s = \frac{V^{1,23} F_e^{0,5}}{422} \quad (12)$$

$$T = 0,33V^{0,41} F_e^{0,33} \quad (13)$$

A elevação das ondas é dada como o espraiamento por Meer e Janssen (1994) (equação 14) onde K é um fator de rugosidade da superfície do talude.

$$S_1 = 1,6K \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_s/L}} H_s \quad (14)$$

Mesmo deixando claro que considerar a sismicidade da região no Brasil é algo irrelevante, a ANA apresenta uma forma para calcular a altura da onda gerada por um sismo. Por fim, a ANA não deixa expresso qual o cálculo final para obtenção da borda livre. Com as fórmulas apresentadas, subteende-se que seria a soma de todos os fatores.

Ambas as diretrizes indianas (Indian Standart, 1993; Government of India, 2019) utilizam a mesma metodologia de cálculo do USACE (1962) combinadas com as diretrizes do USACE (1997) e USBR (1981). As demais fontes encontradas não apresentam informações suficientes sobre metodologias de cálculo da borda livre, portanto seus resultados não foram abordados neste tópico.

2.5 Conclusão

O estudo aprofundado sobre os aspectos que envolvem o dimensionamento da borda livre possibilitou esclarecer as questões levantadas inicialmente sobre a origem dos estudos, os principais fatores de influência e as metodologias de cálculo da borda livre. É possível concluir que houve evolução na definição da borda livre de uma barragem desde suas primeiras concepções baseadas em estudos oceânicos durante a Segunda Guerra Mundial até as práticas contemporâneas adaptadas para reservatórios interiores.

Dos trabalhos encontrados, percebe-se de antemão que há poucos estudos nacionais abordando o tema em questão, o que já indica uma lacuna do conhecimento a ser preenchida no Brasil. Uma parte significativa foi publicada por órgãos norte-americanos, destacando o protagonismo do U.S. Army Corps of Engineers e do U.S. Bureau of Reclamation. As orientações estabelecidas pelo USACE e USBR ao longo dos anos consolidaram o conceito de borda livre, destacando a importância de considerar tanto a ação do vento quanto as condições máximas de inundação.

No Brasil, das três agências responsáveis pela fiscalização da segurança de barragens ANA, ANM e ANEEL, apenas a ANA estabeleceu o conceito de borda livre, adaptando os conceitos internacionais às realidades locais. A Eletrobras, que é uma empresa de capital aberto líder em geração e transmissão de energia elétrica, apresenta definições e recomendações de borda livre. Com isso, a ausência de definições específicas da ANM e ANEEL, evidencia a necessidade de padronização e detalhamento nos critérios de segurança.

Quanto aos fatores de influência, os métodos consideram improváveis a ocorrência simultânea de níveis máximos de vento e cheias, porém esta suposição está sendo repensada nos manuais mais atuais. Isso pode ser devido às mudanças climáticas que causam eventos extremos mais frequentes. Ademais, todas as fontes convergem para a consideração dos mesmos fatores no geral: caracterização das ondas e configurações do vento. É interessante observar que os estudos de países específicos, como Índia, Austrália e Brasil, contribuem com diretrizes adaptadas às realidades regionais, bem como particularidades locais como sismicidade e potenciais recalques.

No entanto, uma lacuna evidente é a ausência de especificações detalhadas sobre a borda livre para barragens de contenção de rejeitos nas diretrizes de mineração. Estudos como os de Quelopana e Barrera (2015) apontam para a necessidade de integrar mais fatores operacionais e de design específicos dessas estruturas, uma vez que os padrões de crescimento e depósito dos rejeitos podem variar significativamente, impactando a segurança da barragem.

Ao observar as metodologias de cálculo encontradas, percebe-se uma tendência a considerar o mesmo padrão de cálculo das configurações do vento definidos pelo USACE. No

cálculo da caracterização das ondas, o USBR apresenta um modelo que foi referenciado pela maioria dos estudos analisados. Apesar de existir novas formas de calcular os ventos e as ondas, como modelos numéricos computacionais, as fórmulas de entrada continuam com as mesmas considerações do século XX.

Outra lacuna significativa é a consideração dos efeitos da sobrecarga de inundação e dos fenômenos climáticos no cálculo da borda livre. Embora a maioria dos estudos reconheça a importância do fator hidrológico na definição da borda livre, os modelos de cálculo atuais não quantificam adequadamente esses efeitos, nem fornecem uma metodologia precisa para calcular a cheia de projeto que seria considerada na borda livre.

Conclui-se que apesar da evolução dos estudos sobre os cálculos da borda livre em relação ao desenvolvimento e aplicação de fórmulas matemáticas e cálculo numérico, faltam estudos recentes que incluam as mudanças do cenário climático observadas nos últimos anos como fatores de influência para o cálculo da altura da borda livre.

3 IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO DIMENSIONAMENTO DA BORDA LIVRE DE BARRAGENS: ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM BANABUIÚ

3.1 Introdução

A segurança das barragens é um tema de importância crítica no cenário global, especialmente diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas. Mudanças rápidas e generalizadas induzidas pela ação humana estão alterando o balanço hídrico regional e os padrões climáticos (IPCC, 2021; ANA, 2024), trazendo implicações significativas para a segurança de barragens devido aos riscos hidrológicos associados a enchentes raras e extremas (USBR, 2023). Esse cenário gera preocupação, pois muitas barragens foram projetadas para condições climáticas estáveis que estão mudando, aumentando o risco de ruptura e a probabilidade de falhas graves (Carneiro et al., 2022; Fluixá-Sanmartín et al., 2019).

Neste contexto, a borda livre (ou *freeboard*) de uma barragem desempenha um papel essencial na prevenção de transbordamentos e no asseguramento da integridade estrutural das barragens (Ozbahceci; Bilyay, 2018; Tessema, 2020). Apesar de sua relevância, o dimensionamento da borda livre tem se baseado em metodologias tradicionais, como as propostas pelo U.S. Army Corps of Engineers (USACE) e pelo U.S. Bureau of Reclamation (USBR), que predominam em estudos e práticas globais (Pereira; Studart, 2025).

Os métodos de cálculo tradicionais consideram a velocidade do vento como principal fator de influência no cálculo da borda livre, e assumem como mínima a probabilidade de ocorrência simultânea de um vento máximo com uma cheia histórica que causaria o galgamento da barragem (Pereira; Studart, 2025). No entanto, essas abordagens podem ser insuficientes para lidar com as condições climáticas em rápida transformação. Apesar de ser um aspecto pouco abordado, o dimensionamento da borda livre da barragem possui relação direta com a incerteza dos parâmetros hidrológicos (URBR, 1992; ICOLD, 2011; USACE, 2018).

O nível dos reservatórios é diretamente afetado devido às variações extremas e imprevisíveis, impactando a eficiência dos vertedouros e a operação da barragem como um todo (Herbozo et al., 2022). Muitos estudos têm investigado o impacto das condições climáticas futuras na segurança de barragem em todo o mundo (Mallakpour; AghaKouchak; Sadegh, 2019; Fluixá-Sanmartín et al., 2021; Degu et al., 2011; Ghimire; Schulenberg, 2022). Entretanto, há poucos estudos sobre o impacto das alterações climáticas na magnitude das cheias no Brasil,

principalmente nas regiões semiáridas (Carvalho; Souza Filho; Sabóia, 2020; Carneiro et al., 2022; Furtado, 2024), e tampouco nenhum estudo nesse sentido sobre borda livre.

O vento também é um fenômeno climatológico importante a ser considerado, pois sua ação tem influência sobre aspectos fundamentais dos reservatórios, como o próprio dimensionamento da borda livre e das proteções dos taludes em barragens de terra (Marques, 2013; Vilhena et al., 2019). Estudos recentes reforçam a relevância da análise e previsão do comportamento variável e dos padrões não lineares do vento (Kumar; Mishra; Kumar, 2022; Miele; Ludwig; Corsini, 2023).

Há indicações de uma relação entre as mudanças climáticas e a variabilidade dos regimes de vento, o que dificulta ainda mais as previsões sobre o comportamento futuro do vento (Kara; Şahin, 2023; Wohland; Folini; Pickering, 2021; Raphaldini et al., 2020).

Assim, surge a necessidade de acrescentar o impacto das mudanças nos padrões climáticos ao cálculo da borda livre da barragem, a fim de que haja uma combinação dos resultados hidrológicos (cheia máxima ajustada) com os fatores de influência tradicionais (ventos e ondas). Isso é possível pois existem cenários climáticos fornecidos por Modelos Globais de Circulação (GCM) que, combinados com os diferentes cenários de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) permitem estimar uma resposta do sistema às mudanças do clima (IPCC, 2023; Furtado, 2024).

O Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP) foi estabelecido para estudar e intercomparar simulações climáticas feitas com GCMs (Meehl et al., 2000). O CMIP possui 5 fases com dados de produção de modelagem para uso geral, e a fase mais recente, CMIP6, conta com a participação de mais de 40 grupos de modelos mundiais e demonstra melhorias substanciais em relação às gerações anteriores (Eyring et al., 2016; Bock et al., 2020).

O Nordeste do Brasil, especificamente o semiárido nordestino, é uma das regiões da América do Sul que está mais vulnerável às mudanças do clima (Marengo, 2007; Pereira et al., 2023). O Ceará, localizado predominantemente no semiárido nordestino, é um dos estados do Brasil que possui uma grande quantidade de barragens construídas (Carvalho; Souza Filho; Brito, 2024). Com isso, um estudo de caso com uma grande barragem nessas circunstâncias seria fundamental e representativo para regiões semiáridas. A Barragem Arrojado Lisboa, que barra a água do Rio Banabuiú, foi selecionada para este estudo por ser o terceiro maior reservatório de água do estado do Ceará, e ter como principais finalidades o controle de cheias e a irrigação (Guidicini; Sandroni; Mello, 2021).

Este estudo se propõe a reavaliar as práticas atuais de dimensionamento da borda livre, integrando fatores climáticos em sua análise. Utilizando a Barragem Arrojado Lisboa

(conhecida popularmente como Barragem Banabuiú), do Açude Banabuiú como estudo de caso, a pesquisa compara as metodologias tradicionais do USACE (2018), USBR (2012) e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2016), com uma abordagem que considera cenários de mudanças climáticas, avaliando as implicações práticas do método proposto. Os resultados deste estudo têm o potencial de contribuir para a melhoria da segurança de barragens em regiões vulneráveis, como as semiáridas, e para a formulação de diretrizes mais robustas frente às incertezas climáticas futuras.

3.2 Metodologia

Neste estudo, são investigados diferentes métodos de cálculo para o dimensionamento da borda livre de uma barragem de terra, com o objetivo de identificar as melhores práticas no cálculo da borda livre sob condições tradicionais e considerando cenários de mudanças climáticas para a Barragem de Banabuiú. O estudo de caso busca fortalecer a argumentação teórica e demonstrar a aplicabilidade prática das metodologias discutidas.

Os métodos a serem abordados neste estudo são USBR (2012), USACE (2018) e ANA (2016). A escolha das duas metodologias americanas se deu pelo protagonismo internacional que ambas apresentaram ao longo do tempo, servindo de referência para a maioria dos estudos relacionados a borda livre existentes (Pereira; Studart, 2025). A metodologia ANA (2016) é a diretriz para elaboração de projeto de barragens que é aplicada e seguida no Brasil, selecionada para esta análise devido a sua importância na localidade do estudo de caso em questão.

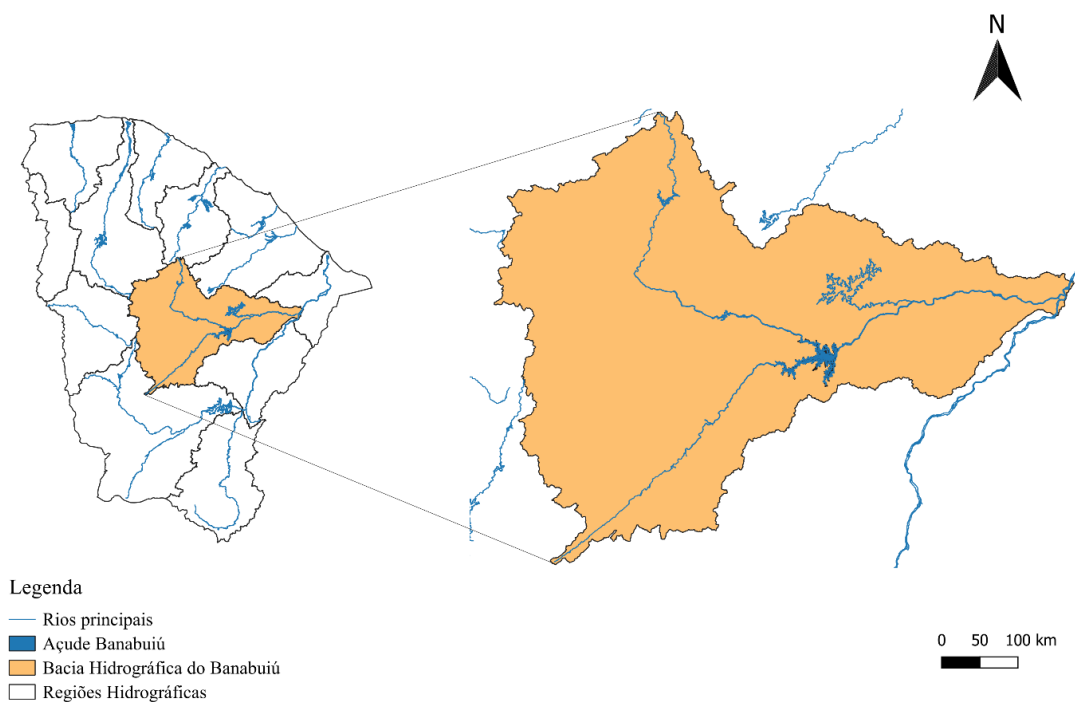
As etapas metodológicas seguem a seguinte sequência: realizar o cálculo da borda livre de acordo com os métodos tradicionais; aplicar uma abordagem que considera dados de eventos extremos relacionados a cenários climáticos futuros; e analisar se os impactos das mudanças climáticas causam alterações significativas nos resultados para a borda livre da barragem, em comparação com os métodos tradicionais.

3.2.1 Área de estudo

O estado do Ceará, localizado predominantemente na região semiárida brasileira, é dividido em 12 regiões hidrográficas. A Bacia Hidrográfica do Banabuiú apresenta-se como uma sub-bacia da grande Bacia do Jaguaribe, e sua área de drenagem corresponde a pouco mais de 13% de todo o território do estado (Oliveira, 2018).

O local de estudo é a barragem Arrojado Lisboa (conhecida como Barragem Banabuiú), do Açude Banabuiú, que está localizada no município de Banabuiú, estado do Ceará (Figura 1), a cerca de 230 km da capital Fortaleza. Barra o Rio Banabuiú, pertencente ao sistema do Rio Jaguaribe.

Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Banabuiú no estado do Ceará.

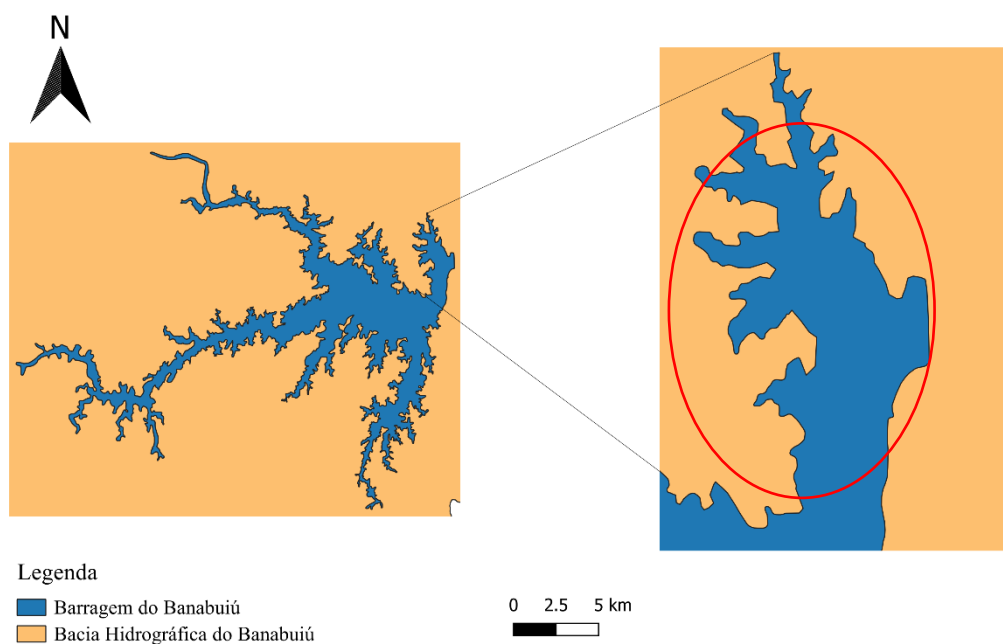


Fonte: elaborado pela autora.

A construção da barragem de Banabuiú foi concluída em 1966 pelo Departamento Nacionais de Obras Contra as Secas (DNOCS) e atualmente é de propriedade da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH). A barragem possui capacidade máxima de 1,6 bilhões de metros cúbicos e atualmente é o terceiro maior reservatório do estado. A principal finalidade da barragem é o controle de cheias e a irrigação, além de atender a demanda de abastecimento humano urbano e rural.

A Figura 2 abaixo mostra a área de interesse da barragem que será utilizada para os cálculos subsequentes.

Figura 2 - Área de interesse da Barragem do Banabuiú.



Fonte: elaborado pela autora.

O regime de chuvas na região está associado a uma alta variabilidade espaço-temporal, com períodos de seca frequentes, mas com chuvas fortes concentradas em curtos intervalos de tempo (Marengo, 2007; Pereira et al., 2023). Um dos principais mecanismos que afetam a precipitação na região é a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que se desloca ao longo do ano e é responsável por grande parte das chuvas durante a estação chuvosa, especialmente nos meses de março e abril, quando a precipitação atinge seu pico (Dos Santos et al., 2010; Salviano; Groppo; Pellegrino, 2016).

Os fenômenos climáticos conhecidos como El Niño e La Niña também têm um impacto significativo sobre o regime pluviométrico do Ceará, sendo o El Niño associado à intensificação dos períodos de seca e redução das precipitações, enquanto o La Niña tende a favorecer anos mais chuvosos (Rodrigues et al., 2021).

No que se refere aos regimes de vento, as velocidades extremas de vento na maior parte do território brasileiro são determinadas por eventos meteorológicos não sinóticos, ou seja, não ocorrem com frequência e representam fenômenos extremos (Loredou-Souza et al., 2023; Vallis, 2019). Os fenômenos atmosféricos que geram os ventos intensos predominantes no Nordeste, mais especificamente na região semiárida, são os ventos alísios e os ventos (perturbações) de leste (Loredou-Souza et al., 2023).

3.2.2 Dados utilizados

3.2.2.1 Dados da barragem

A estrutura da barragem é composta por uma barragem principal, a qual será aplicado esse estudo, constituída por um maciço de terra zoneado com um núcleo impermeável, mais uma barragem auxiliar de menor tamanho constituída pelo mesmo material. Possui um vertedouro de concreto em Perfil Creager com salto de esqui dotado de 6 comportas móveis. A Tabela 1 abaixo apresenta uma ficha técnica resumida da Barragem Arrojado Lisboa (Banabuiú).

Tabela 1 - Ficha Técnica da Barragem Banabuiú.

| | |
|----------------------------------------------------|----------------|
| Latitude | 05°19'41,16" S |
| Longitude | 38°55'21,82" W |
| Altura da barragem (m) | 57,70 |
| Cota do Coroamento (m) | 146,00 |
| Nível d'água máximo operacional (m) | 142,50 |
| Declividade do talude (α) | 1V:2,5H |
| Borda livre real (m) | 3,50 |

Fonte: Adaptado de ANA (2016).

3.2.2.2 Dados climáticos

Os dados climáticos utilizados neste estudo são os dados de precipitação máxima e os dados de velocidade do vento máximo.

Para este estudo, os dados de precipitação máxima para o cálculo do nível máximo do reservatório foram obtidos a partir do estudo de Furtado (2024). O estudo de Furtado (2024) utilizou modelos climáticos do CMIP6 (Sexta Fase do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados) para avaliar as alterações nas precipitações máximas e nos regimes hidrológicos na região da Barragem de Banabuiú, comparando dois cenários de emissão de GEE (SSP2-4.5 e SSP5-8.5). A análise comparativa entre a série de dados baseline (1975-2020) e os cenários futuros (2020-2100) forneceu informações cruciais sobre as possíveis elevações do nível do reservatório devido às mudanças climáticas.

Os modelos do CMIP6 diferem das versões anteriores do CMIP, por terem uma faixa maior de sensibilidade climática e serem conduzidos com cenários baseados em SSPs (Caminhos Socioeconômicos Compartilhados), novos caminhos futuros de desenvolvimento social (O'Neill et al., 2016; IPCC, 2021). O SSP2 prevê um cenário de emissões intermediárias

de GEE, no qual as tendências continuam seus padrões históricos sem desvios substanciais (IPCC, 2021). O SSP5 prevê emissões muito altas de GEE, economia com foco em energia e com geração baseada e combustíveis fósseis (O'Neill et al., 2016).

As bases de dados de velocidade do vento para análise de projeções futuras foram extraídas através da plataforma ESGF (Earth System Grid Federation), filtrando a variável para ventos máximos “sfcWindmax” com frequência diária, pois como o objetivo é analisar eventos extremos, é mais recomendável analisar dados de vento máximo diário. Os dados de velocidade foram selecionados para os dois cenários de emissão de GEE (SSP2-4.5 e SSP5-8.5)

Para a análise da velocidade do vento observacional, foram solicitados os dados das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizadas nos municípios de Quixeramobim e Morada Nova. A estação meteorológica de Morada Nova (A332) fica situada a 83,0 km à montante do Açude Banabuiú, e a estação de Quixeramobim (A325) se situa a aproximadamente 75km a jusante da barragem.

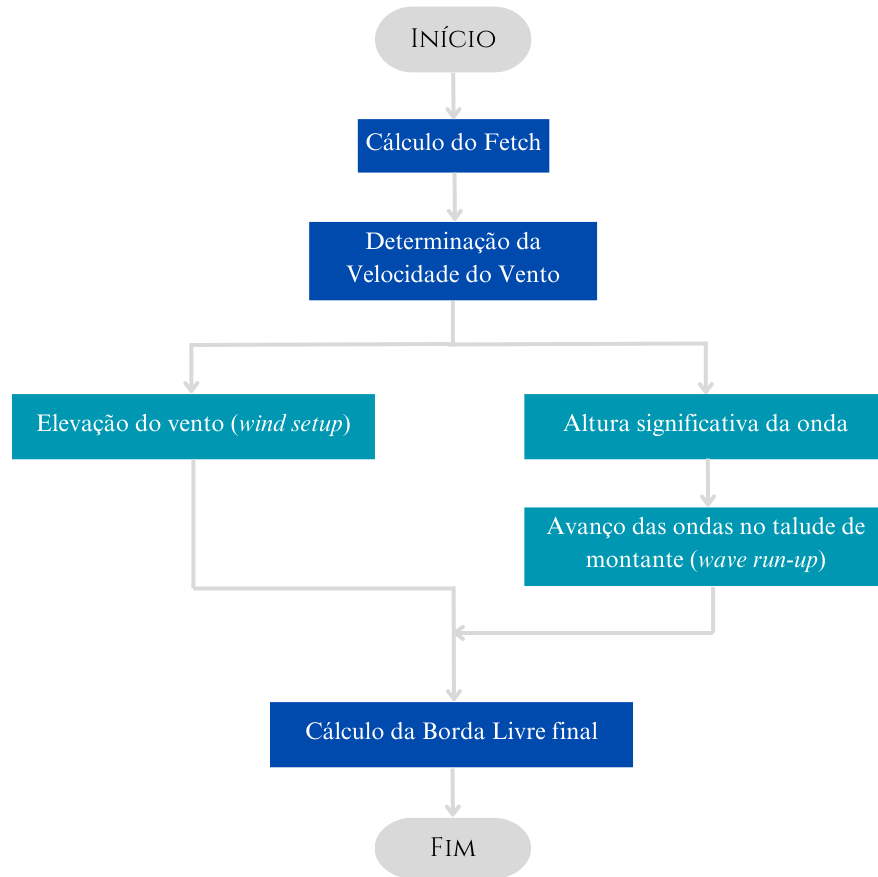
A análise foi feita com os dados de rajada máxima em metros por segundo medidos a 10 metros de altura do solo, disponibilizados pelo INMET das duas estações meteorológicas, com medição diária de 31/12/2007 a 31/12/2024. As séries históricas de ambas as estações continham falhas, por isso foi feito o preenchimento dos dados nulos através de uma correlação entre as séries das estações A332 e A325. O preenchimento foi feito com regressão linear e interpolação linear dos valores nulos em ambas as séries.

O intuito foi obter uma série de dados históricos completa para servir como base para as análises futuras. No entanto, devido ao curto período de medição (início em 2007) e à presença de falhas nos dados, não há possibilidade de fazer análise de eventos extremos com certos períodos de retorno para a intensidade do vento no local. Assim, foi necessário recorrer a outras fontes para determinar a velocidade do vento de projeto em cada método, como o mapa de isopletras do trabalho de Loredou-Souza et al. (2023).

3.2.3 Descrição dos métodos de cálculo da borda livre

A abordagem metodológica utilizada para calcular a borda livre da barragem comum a todos os métodos está sistematicamente descrita no fluxograma da Figura 3. Uma descrição detalhada das etapas metodológicas apresentadas em cada método é fornecida nos tópicos a seguir.

Figura 3 - Metodologia de cálculo da borda livre de maneira sistemática



Fonte: elaborado pela autora.

3.2.3.1 Cálculo do Fetch

Este tópico é dedicado ao cálculo do fetch efetivo exclusivamente, dado que USACE, USBR e ANA utilizam como referência o método proposto por Saville (1954), adota-se neste tópico o mesmo modelo de cálculo.

O fetch efetivo (F_e) é a distância radial média que o vento percorre sobre a superfície de um reservatório até o ponto de interesse que gera a maior subida de onda (USACE, 2018). É importante destacar que este alcance pode estar centrado em uma direção de vento ou pode não estar, pois depende da disponibilidade das direções de velocidades do vento. Com isso, o fetch selecionado como fetch efetivo nem sempre é a distância mais longa através do reservatório.

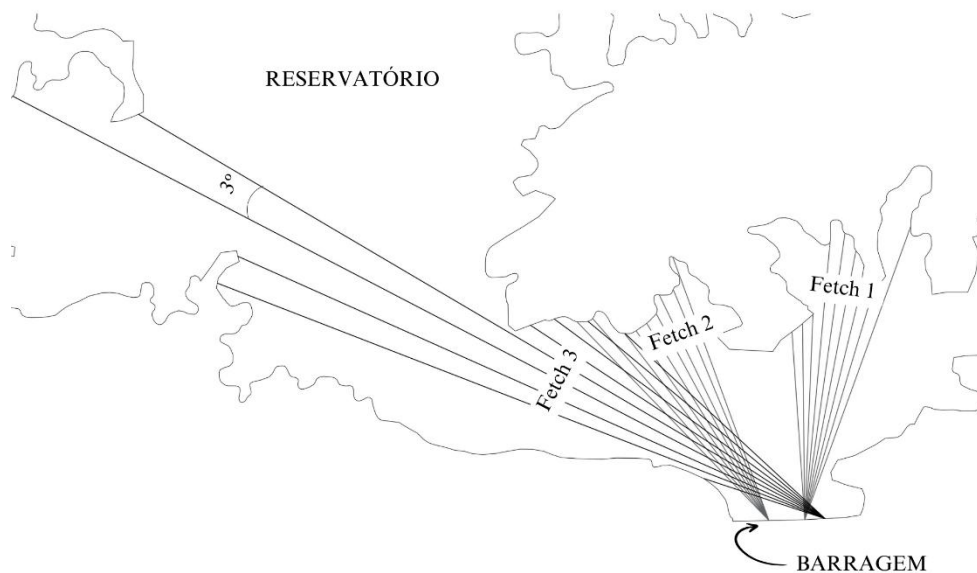
A partir disso, o fetch efetivo é estimado desenhando-se linhas centrais partindo do ponto de interesse até a margem oposta. Nove radiais separadas por 3 graus e abrangendo 12 graus de cada lado da linha central são desenhadas, criando um leque total de 24 graus. Os

comprimentos dos radiais são, então, calculados em média para cada alcance, determinando-se o comprimento do fetch efetivo.

Para realizar o cálculo na barragem do Banabuiú, a camada do reservatório foi exportada do *software* QGis para o AutoCad na escala 1:1000, para que fosse feito o cálculo do fetch. Esse procedimento facilitou o cálculo dos segmentos de distância, isto é, o traçado das radiais a partir da parede da barragem.

Uma distância real de referência foi calculada no QGis a partir de pontos vetoriais, e com essa distância ajustou-se a escala do contorno do reservatório no AutoCad para a distância real de referência. Assim, foram traçados três leques de 24 graus centrados na direção do vento com nove radiais separadas por 3 graus entre si, como mostra a Figura 5 a seguir. Os resultados obtidos estão ilustrados na tabela abaixo.

Figura 4 - Os 3 leques de fetch encontrados a partir da barragem.



Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 2 - Cálculo do Fetch Efetivo nas três direções analisadas.

| Radial | Ângulo | Fetch 1 - 172° (km) | Fetch 2 - 212° (km) | Fetch 3 - 240° (km) |
|---------------|---------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | 12° | 2,143 | 1,952 | 1,899 |
| 2 | 9° | 1,677 | 1,741 | 2,149 |
| 3 | 6° | 1,707 | 1,747 | 2,345 |
| 4 | 3° | 1,906 | 1,640 | 2,457 |
| 5 | 0° | 2,015 | 1,616 | 5,556 |
| 6 | 3° | 1,941 | 1,613 | 6,384 |
| 7 | 6° | 1,429 | 1,650 | 4,485 |
| 8 | 9° | 1,365 | 1,868 | 4,545 |
| 9 | 12° | 1,311 | 1,926 | 0,890 |

| | | | |
|-------|--------|--------|--------|
| Total | 15,494 | 15,753 | 30,710 |
|-------|--------|--------|--------|

Fonte: elaborado pela autora.

Sendo o comprimento do alcance efetivo a soma dos comprimentos dos radiais dividida pelo número de radiais, tem-se:

$$F_1 = \frac{15.494}{9} = 1,722 \text{ km} \quad (1) \quad F_2 = \frac{15.753}{9} = 1,75 \text{ km} \quad (2) \quad F_3 = \frac{30,71}{9} = 3,41 \text{ km} \quad (3)$$

Com isso, conclui-se que o maior fetch encontrado foi de 3,41 quilômetros na direção de 240° Sudoeste, dado pela equação 3, e esse valor será aplicado nos cálculos subsequentes.

3.2.3.2 Profundidade média ao longo do fetch

Seguindo o método USACE (2018), a profundidade média ao longo do fetch efetivo do talude da barragem é determinada a partir de várias seções transversais do reservatório. Porém não foi possível obter essas informações para a barragem de Banabuiú neste estudo. O boletim diário da Funceme (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos) exhibe o nível da água nos principais açudes do estado, como também o gráfico de cota-área-volume do reservatório.

Entretanto, como informado anteriormente, o regime pluviométrico da região enfrenta uma alta variabilidade tanto anual quanto interanual, portanto é incerto definir um valor de profundidade média para o reservatório em questão, pois seu volume tende a variar significativamente no tempo.

Para os cálculos subsequentes, a profundidade do reservatório será definida tendo como referência a cota do nível de água máximo operacional, e a altura total da parede da barragem apresentados na Tabela 1 anteriormente. A profundidade do reservatório será assumida como sendo aproximadamente 54,2 metros.

3.2.4 Metodologia U.S. Army Corps of Engineers (USACE)

A fonte utilizada para este tópico é o manual EM 1110-2-1420 – *Hydrologic Engineering Requirements for Reservoirs*, publicado em 2018 pelo USACE. Para o

cálculo da estimativa de borda livre, o EM 1110-2-1420 (USACE, 2018) apresenta um exemplo completo para a barragem de Fort Peck (Rio Missouri, Montana, EUA).

3.2.4.1 Determinação da velocidade do vento

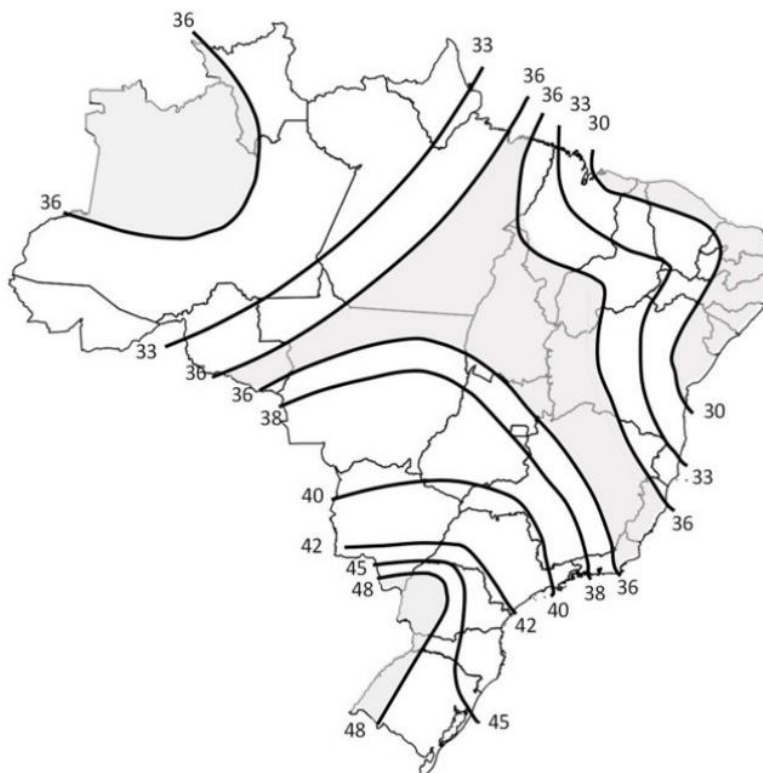
O método USACE (2018) aplicado para a barragem de Fort Peck utiliza ventos com frequência de 4%, 2% e 1%, contendo 25, 50 e 100 anos de período de retorno respectivamente. Os dados de velocidade e duração dos ventos para a análise são específicos do local, e são escolhidas as velocidades que se encontram na direção do maior *fetch* encontrado.

Entretanto, devido à insuficiência de dados do local da Barragem de Banabuiú, não foi possível obter os ventos extremos com certos períodos de retorno. Foi necessário recorrer a estudos independentes para determinar a velocidade do vento neste caso. Nas subseções a seguir está detalhado como foi definida a velocidade de vento de projeto.

3.2.4.1.1 Dados de vento

Com base nas máximas velocidades médias obtidas na pesquisa de Vallis (2019), Loredo-Souza et al. (2023) delineou as regiões com regimes atmosféricos que geram ventos intensos semelhantes e elaborou o mapa da Figura 5 a seguir, representando a máxima velocidade média medida em 3 s, que pode ser excedida, em média, uma vez a cada 50 anos, a 10 metros do nível do solo em áreas abertas e planas.

Figura 5 - Mapa básico de velocidade de vento (isopletas em m/s).



Fonte: Loredo-Souza et al., 2023.

A região que compreende a bacia hidrográfica do Banabuiú está inserida entre a isopleta de 30 m/s e a isopleta de 33 m/s, com período de retorno de 50 anos, ou seja, 2% de probabilidade de excedência. Neste estudo será utilizada a velocidade de 33 m/s.

Loredo-Souza et al. (2023) apontam que a insuficiência dos dados históricos de vento no Brasil limita as análises a períodos de retorno não superiores a 50 anos. Os pesquisadores concluem que há uma necessidade de aumentar significativamente a confiabilidade dos dados de velocidade do vento coletados no Brasil.

3.2.4.1.2 Velocidade do vento sobre a água

Ao longo do tempo, foi considerado que as velocidades do vento medidas são aumentadas à medida que o vento sai da área terrestre e atravessa a água, pois as velocidades de vento sobre a água são maiores (USACE, 1962; USBR, 1981). A metodologia USACE (2018) aponta que as velocidades de vento precisam ser ajustadas para velocidades do vento sobre a água. Entretanto, como o fetch calculado é muito pequeno (menor que 10 milhas), não há necessidade de considerar as variações do vento

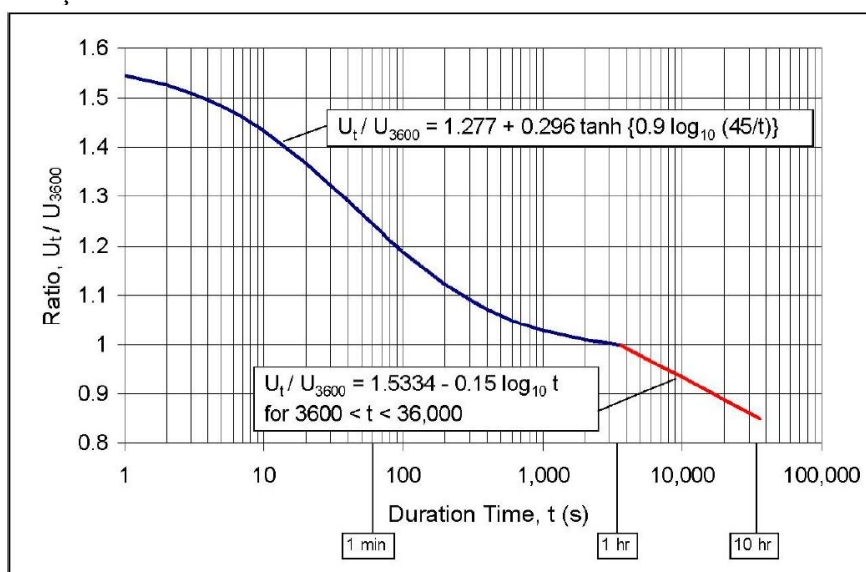
ao longo do fetch. As correções de estabilidade relacionadas à temperatura do ar também foram desconsideradas devido ao curto fetch.

3.2.4.1.3 Frequência e duração da velocidade do vento

Os ventos em qualquer ponto da Terra representam uma sobreposição de várias escalas atmosféricas de movimento, o que faz com que raramente permaneçam constantes por longos períodos (USACE, 2015). Portanto, é fundamental reconhecer o intervalo de média dos dados de vento aplicados em cada análise.

A Figura II-2-1 do EM 1110-2-1100 (USACE, 2015), por exemplo, apresenta a relação entre ventos extremos de diferentes durações e ventos de 1 hora. O cálculo do USACE aplica a velocidade do vento com duração de 1 hora.

Figura 6 - Razão entre a velocidade do vento de qualquer duração U_t e a velocidade do vento de 1 hora U_{3600} .



Fonte: USACE (2015).

O vento encontrado nas isopletas representa uma duração de 3 segundos, aplicando a equação fornecida pela figura II-2-1 ou analisando o valor da curva no gráfico que corresponde a $t = 3s$, obtém-se:

$$\frac{U_t}{U_{3600}} = 1,51$$

$$U_{3600} = \frac{33}{1,51} = 21,85 \text{ m/s}$$

Portanto, 21,85 m/s é o valor estimado para o vento extremo com duração de 1 hora.

3.2.4.1.4 Velocidade do vento de projeto

A geração de ondas em um reservatório pode ser limitada tanto pelo fetch quanto pela duração. As velocidades e durações de vento de projeto correspondem à interseção de curvas de frequência-duração do vento no local com as curvas de frequência-duração limitadas pelo fetch. Essas interseções identificam as condições de vento mais críticas que poderão gerar as maiores ondas.

Para obter uma curva de frequência-duração do vento com base em apenas um dado de vento, como nesse caso, o processo pode ser limitado, já que normalmente essas curvas são geradas a partir de uma série temporal de dados de vento cobrindo diferentes velocidades ao longo do tempo. Portanto, a velocidade de vento de projeto que será usada para determinar a altura significativa da onda e seu período será aquela estimada para a duração de 1 hora calculada anteriormente, isto é, 21,85 m/s.

3.2.4.2 Elevação do vento (*wind setup*)

O *wind setup* é a elevação do nível da água causada pelo vento, componente necessário para determinação da borda livre. A fórmula para o cálculo do *wind setup* mais utilizada pelo USACE foi originalmente desenvolvida por engenheiros holandeses com o projeto Zuider Zee (USACE, 1962), e é dada por:

$$S = \frac{U^2 F}{CD} \quad (4)$$

Onde:

U = é a velocidade de projeto selecionada, em km/h;

F = é o fetch calculado, em quilômetros;

C = 62.000 para unidades métricas (USACE, 2018); e

D = é a profundidade do reservatório.

3.2.4.3 Altura e período de onda significativo

O método USACE (2018) relaciona a altura significativa da onda gerada pelos ventos com a velocidade média do vento, sua duração e o fetch disponível para o crescimento da onda. A equação 5 abaixo tem sua origem no desenvolvimento contínuo de modelos de previsão de ondas do USACE.

$$H_s = \frac{4,13 \times 10^{-2}}{g} [0,001U^2(1,1 + 0,035U)] \times \left[\frac{gF}{(0,001U^2(1,1 + 0,035U))} \right]^{1/2} \quad (5)$$

Onde:

H_s = altura significativa da onda em metros; e

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$, é a aceleração da gravidade.

O período da onda T , em segundos, é calculado pela equação abaixo:

$$T = \frac{0,651}{g} [0,001(1,1 + 0,035U)U^2]^{1/2} \times \left[\frac{gF_e}{(0,001(1,1 + 0,035U)U^2)} \right]^{1/3} \quad (6)$$

3.2.4.3.1 Altura extrema da onda

A elevação máxima da onda é a altura excedida por apenas 2% das ondas incidentes. Ela é considerada no cálculo da borda livre pois as ondas apresentam variação de altura e comprimento. A relação para definir a altura extrema da onda ($H_{2\%}$) é dada por:

$$H_{2\%} = 1,40H_s \quad (7)$$

3.2.4.4 Avanço das ondas (wave run-up)

O avanço das ondas (*wave run-up*) é calculado a partir das equações do EM 1110-2-1100, como descrita na equação 9 abaixo. Na equação 8, ξ é um parâmetro de quebra de ondas, chamado *surf-similarity*.

$$\xi = \frac{\tan \theta}{\sqrt{\frac{2\pi H_s}{gT_s^2}}} \quad (8)$$

Onde:

$\tan \theta = \frac{1}{2,5}$ é a inclinação do talude de montante;

Para o cálculo do avanço das ondas, o método aplica a seguinte relação:

$$\frac{R_{i\%}}{H_s} = (A\xi + C)\gamma_r\gamma_b\gamma_h\gamma_\beta \quad (9)$$

Onde:

A e C são coeficientes dependentes de ξ e $i\%$ (USACE, 2011); e

γ_h , γ_β e γ_b são fatores de redução que podem ser assumidos como 1.

De acordo com a tabela VI-5-2 do EM 1110-2-1100, com esse valor de ξ calculado para o avanço de onda extremo, $A = 1,60$ e $C = 0$. Pela tabela VI-5-3, o fator de redução $\gamma_r = 0,55$ para barragem de terra.

3.2.4.5 Cálculo da borda livre final

A borda livre necessária é encontrada somando a elevação extrema da onda ($R_{2\%}$) com a elevação do vento (S). Esse valor deve ser acrescentado acima da cota do nível máximo operacional onde estão as comportas da barragem.

3.2.5 Metodologia U.S. Bureau of Reclamation (USBR)

A fonte utilizada para este tópico é o “Chapter 6: Freeboard” do Design Standart No. 13 – Embankment Dams publicado em 2012 pelo U.S. Bureau of Reclamation. O USBR (2012) afirma que tomou como base o Coastal Engineering Manual (CEM), numerado EM 1110-2-1100, para elaborar sua versão do padrão de projeto da borda livre.

Inicialmente, o método apresenta uma análise da borda livre, definindo que o valor da borda livre mínima da barragem ser o maior entre:

- a) O nível máximo da superfície da água (MRWS) + 1,00 metro; ou

- b) MRWS + *wave run-up* e *setup* de um vento cuja velocidade foi excedida 10% das vezes.

3.2.5.1 Determinação da velocidade do vento

O método recomenda usar dados específicos do local para gerar uma distribuição de probabilidade da velocidade do vento sobre a água. No caso específico dos Estados Unidos, há uma base de dados de vento que lista o número de ocorrências em que uma dada velocidade do vento foi excedida por um número selecionado de horas consecutivas. No caso da localidade deste estudo não há disponibilidade de dados conforme citado no método USBR. Neste caso, o manual indica que outros dados e métodos podem ser utilizados para derivar a distribuição de probabilidades do vento.

A análise foi feita com os dados de rajada máxima em metros por segundo disponibilizados pelo INMET da estação meteorológica de Morada Nova (A332) e Quixeramobim (A325) com medição diária de 31/12/2007 a 31/12/2024.

A velocidade do vento excedida em 10% das vezes (U_{10}) foi estimada através de três métodos: método empírico baseado na distribuição de frequência acumulada observada; distribuição de Weibull; e distribuição de Gumbel ajustada aos dados horários. As análises foram realizadas utilizando o software R (R Core Team, 2023).

A análise empírica consiste apenas em ordenar os dados em ordem decrescente e identificar o valor de velocidade de vento cuja frequência acumulada é 0,1 (10%). A distribuição de Weibull é uma distribuição de probabilidade contínua usada e aceita como um bom regulador para dados de medição de ventos (Costa Rocha et al., 2012; Silva et al., 2020). A distribuição de Gumbel, por sua vez, é amplamente aplicada na análise de dados hidrológicos (Furtado, 2024; Nobre et al., 2021).

A distribuição de probabilidade de Weibull possui dois parâmetros: o fator de forma (k) e o fator de escala (c). Para cada velocidade do vento é observada uma probabilidade de ocorrência dada pela equação 10, onde $f(v)$ é a frequência de probabilidade de ocorrência e v é a velocidade em metros por segundos. A frequência de distribuição acumulada $F(v)$ é determinada pela equação 11.

$$f(v) = \frac{k}{c} \cdot \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \cdot \frac{v^{(k-1)}}{c} \quad (10) \quad F(v) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (11)$$

A distribuição de Gumbel utiliza os parâmetros de localização (μ) e de escala (β) em suas equações. A equação 12 descreve a função densidade de probabilidade $f(v, \mu, \beta)$, e a equação 13 descreve a função de distribuição acumulada $F(v, \mu, \beta)$.

$$f(v, \mu, \beta) = \frac{1}{\beta} \cdot \exp \left[-\frac{v - \mu}{\beta} - \exp \left(-\frac{v - \mu}{\beta} \right) \right] \quad (12) \quad F(v, \mu, \beta) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{v - \mu}{\beta} \right) \right] \quad (13)$$

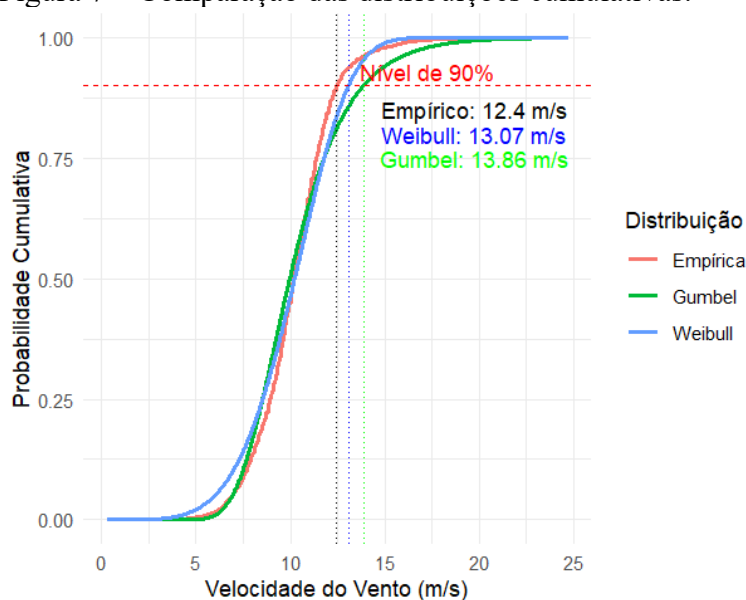
Os parâmetros são estimados pelo método da máxima verossimilhança (MMV). O estudo de Silva et al. (2020) comprovou através de indicadores de desempenho que o MMV é o melhor método para o nordeste brasileiro para estimar os parâmetros k e c da distribuição de Weibull. A Tabela 3 a seguir mostra os resultados obtidos na análise. A figura 7 em seguida apresenta uma comparação das curvas de distribuição acumulada.

Tabela 3 – Parâmetros estimados e valores de velocidade excedidos em 10% do tempo.

| Distribuição | Parâmetros | Velocidade excedida em 10% das incidências (m/s) |
|--------------|---------------------------------|--------------------------------------------------|
| Empírica | - | 12,400 |
| Weibull | $k = 4,878$, $c = 11,018$ | 13,072 |
| Gumbel | $\mu = 9,197$, $\beta = 2,073$ | 13,862 |

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 7 – Comparação das distribuições cumulativas.



Fonte: elaborado pela autora.

A Tabela 4 abaixo apresenta um comparativo da qualidade do ajuste entre as distribuições. As métricas utilizadas para comparação foram: o valor negativo do logaritmo da função de verossimilhança no ponto máximo (negative log-likelihood); o critério de informação de akaike (AIC) e o critério de informação bayesiano (BIC). Quanto menor esses valores, melhor o ajuste.

Tabela 4 - Comparação da qualidade dos ajustes.

| Métrica | Weibull | Gumbel | Diferença | Melhor Ajuste |
|----------------|----------|----------|-----------|---------------|
| Log-likelihood | -13669,7 | -13713,6 | 43,9 | Weibull |
| AIC | 27343,4 | 27431,2 | 87,8 | Weibull |
| BIC | 27356,9 | 27444,7 | 87,8 | Weibull |

Fonte: elaborado pela autora.

O resultado da comparação aponta que a distribuição de Weibull consegue modelar de forma mais adequada a assimetria típica dos dados de velocidade do vento. O parâmetro de forma (k) relativamente alto (4,88) sugere uma distribuição com pico bem definido e menor dispersão. Com isso, o valor de vento que será utilizado para os cálculos subsequentes é $U_{10}=13,072$ m/s dado pela função de distribuição acumulada de Weibull.

3.2.5.2 Elevação do vento (*wind setup*)

A fórmula utilizada para calcular o *wind setup* pelo USBR é mesma a abordada nos manuais do USACE. Entretanto, no USBR (1992) a fórmula é apresentada com uma constante C diferente para U em metros por segundo, fetch em quilômetros e a profundidade D em metros, conforme a equação 14 a seguir.

$$S = \frac{U^2 F}{4850D} \quad (14)$$

3.2.5.3 Altura e período de onda significativo

Segundo o USBR (2012), calcula-se a altura significativa da onda limitada pelo fetch através da equação 15 (em pés):

$$H_s = 0,0245 \times F^{\frac{1}{2}} \times U(1,1 + 0,0156U)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

O resultado deve ser convertido para unidade métrica. O período da onda T, em segundos, é dado pela equação 16:

$$T = 0,464 \times F^{\frac{1}{3}} \times U^{\frac{1}{3}} (1,1 + 0,0156U)^{\frac{1}{6}} \quad (16)$$

3.2.5.3.1 Altura extrema da onda

O método pede que seja considerada a altura média de onda dos 10% mais altos das ondas, o que nos dá a relação da equação 17 de acordo com USBR (2012).

$$H_{10\%} = 1,27H_s \quad (17)$$

3.2.5.4 Avanço das ondas (*wave run-up*)

O *run-up* é obtido de maneira análoga ao manual USACE (2018), calculado a partir das mesmas equações do EM 1110-2-1100, como descritas nas equações 8 e 9 anteriores. O USBR (2012) também recomenda as tabelas VI-5-2 e VI-5-3 do EM 1110-2-1100 para definir os parâmetros da equação 9, para um *run-up* superado por 2% das ondas incidentes.

3.2.5.5 Cálculo da borda livre final

A borda livre necessária é encontrada somando a elevação extrema da onda ($R_{2\%}$) com a elevação do vento (S), cuja velocidade foi excedida 10% das vezes. É importante salientar que o método pede que seja escolhido o maior valor entre 1,00 metro acima do nível máximo da água, ou o valor calculado.

3.2.6 Metodologia Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA)

A fonte utilizada para este tópico é o documento “Diretrizes para a Elaboração de Projetos de Barragens” que pertence ao volume V do Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens publicado pela ANA em 2016.

Em ANA (2016), é indicado que na determinação da borda livre da barragem sejam considerados fatores quantificáveis e não quantificáveis. Os fatores quantificáveis são os associados as ações dos ventos e dos sismos, e os não quantificáveis devido a várias

incertezas relacionadas a operação e funcionamento de uma barragem, entre elas a incerteza hidrológica. Entretanto, não há menção sobre como os fatores não quantificáveis atribuiriam valor na altura da borda livre.

Com isso, neste tópico aborda-se a metodologia de cálculo da ANA para a definição da borda livre considerando os fatores quantificáveis.

3.2.6.1 Determinação do vento máximo

O método não especifica como obter a velocidade do vento a ser aplicada nos cálculos, mas sugere que seja utilizado um valor de vento habitual, com um tempo de recorrência da ordem de duas dezenas de anos. A pouca quantidade de dados históricos (17 anos de observação) não permite mensurar com confiança períodos de retorno, pois essa análise exigiria uma série de dados máximos anuais robusta.

Não estando disponível informação suficiente para estabelecer a velocidade do vento habitual, a ANA (2016) sugere utilizar o valor de 80 km/h recomendado pelo USBR (1987).

3.2.6.2 Elevação do vento (*wind setup*)

Para o cálculo da ação do vento no reservatório, a ANA apresenta a mesma fórmula da elevação do vento (S) abordada no método USACE.

3.2.6.3 Altura significativa da onda

Para estimar a altura a altura significativa das ondas (H_s), a ANA apresenta as fórmulas dadas por Martins (2002):

$$H_s = \frac{U^{1,23} F^{0,5}}{422} \quad (18)$$

$$H_s = \frac{UF^{0,5}}{200} \quad (19)$$

Resolvendo as duas expressões, cada fórmula leva a um resultado distinto, cabendo ao projetista decidir qual resultado melhor se adequa ao projeto. Neste caso, aplica-se o valor encontrado pela equação 19.

Não há menção sobre a altura extrema da onda, calculada nos métodos anteriores. Portanto, esse valor de H_s encontrado é o que será aplicado aos cálculos subsequentes.

3.2.6.4 Avanço das ondas (*wave runup*)

O *run-up* das ondas, dito como espriamento (R), é calculado conforme a equação 20 a seguir dada por Meer e Janssen (1994), também utilizada no USBR (1981):

$$R = 1,6K \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_s/L}} H_s \quad (20)$$

Sendo $K = 0,55$ a rugosidade da superfície do talude de montante (Meer e Janssen, 1994), α é o ângulo desse talude com a horizontal. L é o comprimento de onda, dado por:

$$L = 1,56T^2 \quad (21)$$

Sendo T o período de pico do espectro de ondas dado por:

$$T = 0,33U^{0,41}F^{0,33} \quad (22)$$

3.2.6.5 Cálculo da borda livre final

O valor da borda livre total é calculado somando-se os valores de S e R. A borda livre mínima entre o nível máximo do reservatório e o topo da barragem segundo a ANA deve ser o maior entre 1,00 metro ou o valor calculado.

3.2.7 Metodologia alternativa considerando as mudanças climáticas no cálculo da borda livre

Este método consiste em incorporar as projeções de alterações climáticas nos padrões de ventos máximos e nos regimes de cheias extremas para o cálculo da borda livre, a fim de quantificar as incertezas associadas às condições futuras que poderão afetar a segurança de barragens existentes e em projeto.

A comparação sistemática entre o método proposto e as abordagens tradicionais permitirá uma avaliação quantitativa das possíveis subestimações ou superestimações da borda livre quando os efeitos das mudanças climáticas são negligenciados.

3.2.7.1 Ventos máximos nos cenários de mudanças climáticas

Neste tópico, explica-se como os dados de velocidade do vento de projeto dos modelos climáticos do CMIP6 foram calculados para serem aplicados no estudo, considerando os cenários de emissão de GEE SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

Foram selecionados treze modelos climáticos que apresentassem dados de velocidade diários para a região estudada, conforme a Tabela 5 a seguir. Os modelos selecionados são de última geração, e os diferentes institutos garantem que sua representatividade e distribuição sejam relativamente justas (Liu et al., 2023).

Tabela 5 - Dados dos modelos climáticos usados no estudo.

| Modelo | Instituição | País/Região | Resolução Espacial | Resolução Nominal |
|---------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------------|
| ACCESS-ESM1-5 | Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) | Austrália | 1,875° x 1,25° | 250km |
| BCC-CSM2-MR | Beijing Climate Centre, China Meteorological Administration | China | 1,125° x 1,125° | 100km |
| CanESM5 | Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis | Canadá | 2,81° x 2,81° | 500km |
| CMCC-ESM2 | Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici | Itália | 1° x 1° | 100km |
| CMCC-CM2-SR5 | Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici | Itália | 1° x 1° | 100km |

| Modelo | Instituição | País/Região | Resolução Espacial | Resolução Nominal |
|---------------|-----------------------------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------------|
| CNRM-ESM2-1 | Centre National de Recherches Météorologiques | França | 1,4° x 1,4° | 150km |
| GFDL-CM4 | NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory | EUA | 1° x 1° | 100km |
| GISS-E2-I-G | NASA Goddard Institute for Space Studies | EUA | 2° x 2,5° | 250km |
| INM-CM4-8 | Institute for Numerical Mathematics | Rússia | 2° x 2,5° | 250km |
| INM-CM5-0 | Institute for Numerical Mathematics | Rússia | 1,5° x 2° | 150km |
| IPSL-CM6A-LR | Institute Pierre-Simon Laplace | França | 2,5° x 2,5° | 250km |
| MPI-ESM1-2-HR | Max Planck Institute for Meteorology | Alemanha | 0,9375° x 0,5° | 100km |
| MRI-ESM2-0 | Meteorological Research Institute | Japão | 1,125° x 1,125° | 110km |

Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2024) e Carneiro et al. (2022).

3.2.7.1.1 Processamento dos dados dos modelos

O processamento dos dados obtidos pelos modelos climáticos foi feito com programação em linguagem Python, a fim de extrair as séries de dados geradas por cada modelo, do período de 2025 até 2100 para a região específica do Açude Banabuiú utilizando as coordenadas do barramento (5°19'36.7"S; 38°55'24.7"W). Para isso, foi necessário refinar os resultados dos modelos para a localidade individual através do processo de downscaling, pois não é recomendado o uso dos GCM sem a correção de escala para as ações locais de adaptação a mudanças do clima (Pereima; Amorim; Chaffe, 2018; Wilby; Wigley, 1997).

O downscaling estatístico, foi feito através de um método de correção de viés que utiliza funções de transferência para equiparar as distribuições simuladas e as obtidas através de observações. O método do Mapeamento de Quantis apresenta bons resultados em trabalhos com modelos climáticos (Fang et al., 2014; Pereima; Amorim; Chaffe, 2018). Neste estudo, foi aplicado o método do Mapeamento de Quantis Equidistante (MQE) apresentado por Butcher et al. (2021) e proposto por Li, Sheffield e Wood (2010).

Os métodos de correção de viés se baseiam na diferença entre a simulação histórica do modelo (cenário *historical*) e os dados observados, para corrigir a projeções (futuro). O cenário *historical* é uma simulação retrospectiva feita pelos modelos climáticos para o período passado (1850 a 2014), com o objetivo de reproduzir o clima

real do passado usando dados observacionais de forçantes externas tais como variações solares e influências do homem (Magalhães; Cruz, 2021).

A correção de viés pelo MQE é realizada por meio das seguintes equações:

$$Y^{STN_{FUT}} = X^{GCM_{FUT}} + Y^{adj1} - Y^{adj2} \quad (23)$$

$$Y^{adj1} = F_{o-c}^{-1}(F_{m-p}(x_{m-p})) = F^{-1}((F(X^{GCM_{FUT}}|\theta^{STN}))) \quad (24)$$

$$Y^{adj2} = F_{m-c}^{-1}(F_{m-p}(x_{m-p})) = F^{-1}((F(X^{GCM_{FUT}}|\theta^{GCM}))) \quad (25)$$

Em que $Y^{STN_{FUT}}$ é o valor da projeção corrigido (sem viés) do cenário futuro do modelo climático, $X^{GCM_{FUT}}$ é o valor da projeção do cenário futuro do modelo climático (com viés). Y^{adj1} e Y^{adj2} são, na devida ordem, os fatores de ajuste referentes à diferença entre a distribuição do cenário futuro do modelo climático em relação a distribuição dos dados observados e a distribuição do seu cenário *historical*. θ^{GCM} e θ^{STN} são, respectivamente, os parâmetros da distribuição estatística F ajustada as projeções do cenário *historical* e a série temporal observada.

Os dados observados utilizados para a correção de viés foram aqueles provenientes da série histórica de 31/12/2007 a 31/12/2024, construída a partir das estações meteorológicas de Morada Nova (A332) e Quixeramobim (A325). Apesar de ser uma série curta, os resultados com viés corrigido são mais precisos do que com um downscaling feito por recorte espacial simples.

3.2.7.1.2 Cálculo das velocidades máximas provenientes dos modelos climáticos

A partir dos dados de máximos anuais obtidos dos modelos climáticos, foi feito o ajuste das distribuições dos valores para obter períodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100, 1.000 e 10.000 anos. Os períodos de retorno foram selecionados a fim de observar os impactos a curto, médio e longo prazo.

A qualidade do ajuste das distribuições dos valores foi verificada utilizando o teste de Kolmogorov-Smirnov. A estatística KS representa a maior diferença entre a distribuição cumulativa empírica dos dados e a cumulativa teórica. Um p-valor < 0.05 sugere que se pode rejeitar a hipótese nula de que os dados seguem a distribuição

especificada. O teste foi aplicado às distribuições: Gamma, Gumbel, Generalized Extreme Value (GEV) e Pearson Type III (Pearson-III).

3.2.7.2 Cheias extremas nos cenários de mudanças climáticas

A análise das precipitações máximas a serem aplicadas neste estudo foi retirada do estudo realizado por Furtado (2024), em que foi feita uma avaliação dos impactos das mudanças climáticas na segurança da barragem de Banabuiú. Furtado (2024) aplicou os modelos climáticos do CMIP6 para análise das precipitações máximas, comparando os valores da série de dados *baseline* (1975-2020) com os dados gerados pelos cenários SSP2.4-5 e SSP5.8-5 referente ao período de 2020 a 2100.

3.2.7.3 Cálculo da borda livre final

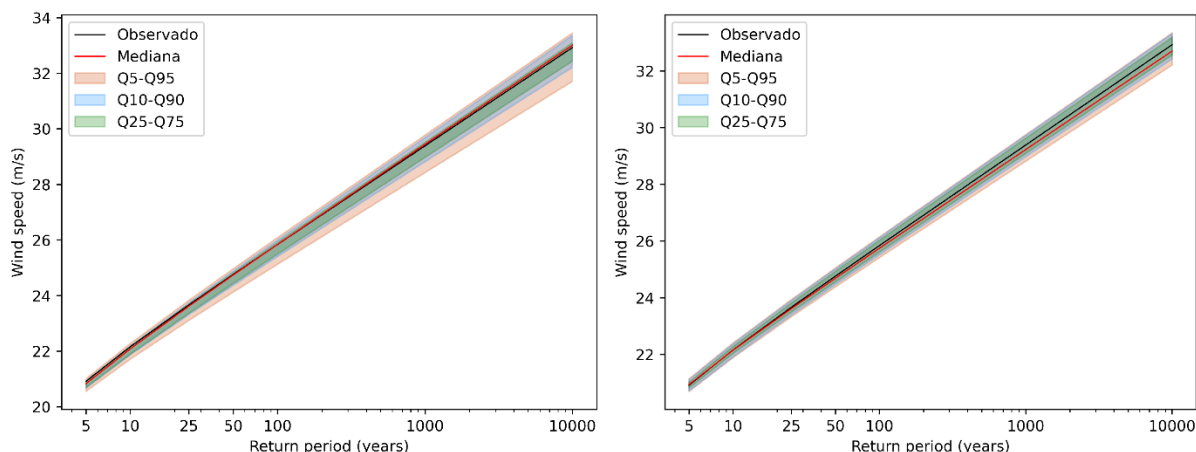
Nesse caso, o cálculo da borda livre foi realizado considerando a soma dos níveis estimados do reservatório para diferentes cenários climáticos com as elevações da água causadas pelo vento (*wind setup* e *wave run-up*), conforme as projeções dos modelos climáticos.

3.2.7.3.1 Determinação do vento máximo

Para incorporar os resultados obtidos dos modelos aos cálculos de dimensionamento, é preferível adotar uma abordagem conservadora. É possível observar nas figuras abaixo como as projeções climáticas de velocidade do vento máximo anual não apresentam altos graus de incerteza.

As medianas apresentam valores muito próximos aos observados e com incerteza pequena, ou seja, as projeções não indicam uma mudança significativa do vento máximo anual futuro. Ainda assim, aplicando o critério de segurança sobre a faixa de incerteza é possível ter uma majoração do vento projetado. A Figura 8 ilustra a amplitude das faixas de incerteza para os cenários SSP2-4.5 (lado esquerdo) e SSP5-8.5 (lado direito).

Figura 8 - Faixas de incerteza das projeções de velocidade do vento máximo anual para o cenário SSP2-4.5 (esquerdo) e para o cenário SSP5-8.5 (direito).



Fonte: elaborado pela autora.

A partir disso, recomenda-se que seja definido um cenário de planejamento, que vise equilibrar adequadamente economia e segurança, evitando projeções excessivamente altas ou baixas para evitar arrependimentos econômicos ou riscos climáticos. Neste trabalho será adotado o 90º quantil das projeções, cobrindo 90% de toda a faixa de incerteza. Nesse caso, haveria 90% dos modelos abaixo desse valor, evitando a utilização de projeções extremamente baixas, e 10% dos modelos acima desse valor, evitando a utilização de projeções extremamente elevadas.

3.2.7.3.2 Elevação do vento (*wind setup*)

Para o cálculo da elevação do nível da água devido ao vento, a equação apresentada nos métodos anteriores é bem consolidada e aceita no dimensionamento da borda livre. Nesse tópico aplica-se a equação 14 indicada pelo USBR, para a velocidade em metros por segundo.

O coeficiente constante da equação é um valor médio baseado em investigações anteriores e pode variar em diferentes bacias. Para estudos futuros, é importante destacar a necessidade de desenvolver coeficientes que adaptem as fórmulas internacionais à reservatórios no semiárido brasileiro.

3.2.7.3.3 Altura e período de onda significativo

As equações 5 e 6 apresentadas pelo método USACE (2018) são boas opções para o cálculo manual da altura significativa da onda e do período da onda, por possuir

formulações matemáticas que capturam melhor as interações físicas que afetam a formação de ondas.

Além disso, as fórmulas são o resultado de anos de estudo e evolução nos métodos de previsão de ondas do Manual de Engenharia Costeira (*Coastal Engineering Manual* – EM 1110-2-1100), última atualização de 2015. Portanto, elas foram utilizadas nessa proposição metodológica com incorporação do efeito das mudanças climáticas.

3.2.7.3.4 Avanço das ondas (*wave run-up*)

A formulação mais recente utilizada pelo USACE e USBR (equação 9) caracteriza melhor o comportamento da onda ao se aproximar da estrutura, devido ao cálculo do parâmetro ξ e dos múltiplos coeficientes de correção. Dessa forma, aplica-se a equação 9 para definir o avanço da onda superado por 2% das ondas incidentes ($R_{2\%}$).

3.2.7.3.5 Borda livre final

Como o trabalho é um estudo de caso sobre uma barragem existente, a borda livre final (BL) calculada será uma combinação entre os níveis da água máximos modelados (NMM) que superaram a cota de coroamento da barragem atual e as elevações do nível da água causadas pelos ventos máximos modelados.

A razão para a escolha dessa combinação se baseia na ausência de metodologias na literatura que a abordem, e na hipótese adotada pelas metodologias tradicionais de que um vento máximo não ocorreria simultaneamente a uma cheia máxima. Neste caso, o intuito é quantificar os impactos dos cenários climáticos futuros.

Caso o estudo fosse feito para uma nova barragem em construção, recomendar-se-ia considerar todos os valores de nível d'água encontrados acima do nível de água máximo projetado para o reservatório. A equação a seguir mostra a fórmula utilizada no cálculo final:

$$BL = (NMM - \text{Nível d'água máximo operacional}) + S + R_{2\%} \quad (23)$$

A equação 23 foi aplicada aos resultados obtidos em cada período de retorno.

3.3 Resultados

Esta seção apresenta os resultados da análise quantitativa dos diferentes métodos de dimensionamento da borda livre aplicados ao caso da Barragem Banabuiú. Os resultados estão organizados em três etapas principais: primeiro, a comparação entre as metodologias tradicionais; em segundo, a análise das projeções climáticas de vento e precipitação; e terceiro, a quantificação dos impactos das mudanças climáticas nos requisitos de borda livre.

A Tabela 6 a seguir mostra os resultados obtidos com os cálculos de cada método tradicional analisado.

Tabela 6 - Valores calculados seguindo as recomendações de cada fonte.

| Metodologia | USACE | USBR | ANA |
|-----------------------|--------|--------|--------|
| F _e (km) | 3,41 | 3,41 | 3,41 |
| U (m/s) | 19,88 | 13,07 | 22,22 |
| S (m) | 0,0062 | 0,0022 | 0,0065 |
| H _s (m) | 0,727 | 0,396 | 0,740 |
| T (s) | 2,097 | 1,98 | 2,98 |
| R ₂ % (m) | 0,786 | 0,550 | 1,13 |
| Borda livre final (m) | 0,792 | 0,552 | 1,140 |

Fonte: elaborado pela autora.

Pode-se inferir dos resultados da tabela 6 que existe uma hierarquia de conservadorismo entre tais métodos tradicionais. Seguindo a ordem decrescente tem-se ANA, USACE e USBR, respectivamente, sendo a metodologia ANA a mais conservadora apresentando o valor da borda livre superior a duas vezes o valor obtido pela metodologia USBR, e sendo o USACE uma alternativa intermediária entre os dois.

Observa-se que, apesar de apresentarem algumas formulações em comum, são os métodos de obtenção da velocidade do vento de projeto que implicam em divergências significativas nos demais valores calculados. Como, por exemplo, para a mesma fórmula de cálculo de elevação do vento (*wind setup*), a ANA entregou um valor quase 300% maior que USBR, devido a consideração de projeto de um vento máximo de 80 km/h, enquanto o USBR considera a velocidade excedida 10% das vezes numa distribuição de probabilidades.

Ainda, a decomposição dos resultados mostra que o avanço das ondas (R₂%) contribui de maneira dominante para a borda livre final quando comparado com a elevação do vento (S). Esta observação indica que as ondas geradas pelo vento, não a

elevação direta do nível d'água causada pelo vento, representam o principal risco para o galgamento da estrutura.

3.3.1 *Análise das velocidades máximas provenientes dos modelos climáticos*

Esta análise é de grande contribuição pois permite estimar velocidades do vento para períodos de retorno muito maiores que a série histórica disponível. A tabela a seguir apresenta os valores estatísticos do teste Kolmogorov-Smirnov utilizado para medir a qualidade da distribuição dos valores de velocidade do vento dos modelos climáticos, considerando grau de significância de 0,05.

Tabela 7 - Teste de Kolmogorov-Smirnov.

| Distribuição | Estatística KS | p-valor |
|--------------|----------------|---------|
| Gamma | 0,1578 | 0,7034 |
| Gumbel | 0,1252 | 0,9077 |
| GEV | 0,1264 | 0,9018 |
| Pearson-III | 0,1128 | 0,9564 |

Fonte: elaborado pela autora.

Observa-se que para todas as distribuições, p-valor $> 0,05$, logo não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula do teste de Komoglorov-Smirnov. Baseado na estatística do teste, observa-se que a distribuição Pearson-III apresenta o melhor desempenho.

A Tabela 8 a seguir apresenta um resumo dos resultados obtidos para todos os modelos analisados em cada cenário de emissão de GEE, para os respectivos tempos de retorno (TR) de 5, 10, 25, 50, 100, 1.000 e 10.000 anos. As Figuras 9 e 10 mostram a comparação entre os modelos e os cenários a partir dos dados ajustados.

Tabela 8 - Velocidades máximas anuais provenientes dos modelos climáticos.

| Modelo | Cenário | Velocidade do vento em cada TR (m/s) | | | | | | |
|---------------|----------|--------------------------------------|---------|---------|---------|----------|-----------|------------|
| | | 5 anos | 10 anos | 25 anos | 50 anos | 100 anos | 1000 anos | 10000 anos |
| ACCESS-ESM1-5 | SSP2-4.5 | 21.13 | 22.41 | 23.96 | 25.09 | 26.20 | 29.85 | 33.49 |
| | SSP5-8.5 | 21.20 | 22.46 | 23.98 | 25.09 | 26.18 | 29.76 | 33.33 |
| BCC-CSM2-MR | SSP2-4.5 | 20.91 | 22.16 | 23.68 | 24.78 | 25.87 | 29.44 | 33.01 |
| | SSP5-8.5 | 21.11 | 22.36 | 23.87 | 24.98 | 26.06 | 29.63 | 33.19 |
| CanESM5 | SSP2-4.5 | 20.67 | 21.87 | 23.31 | 24.36 | 25.40 | 28.80 | 32.20 |
| | SSP5-8.5 | 20.69 | 21.90 | 23.37 | 24.44 | 25.50 | 28.96 | 32.42 |
| CMCC-ESM2 | SSP2-4.5 | 20.69 | 21.90 | 23.35 | 24.41 | 25.45 | 28.88 | 32.29 |

| Modelo | Cenário | Velocidade do vento em cada TR (m/s) | | | | | | |
|---------------|----------|--------------------------------------|------------|------------|------------|-------------|--------------|---------------|
| | | 5 anos | 10 anos | 25 anos | 50 anos | 100 anos | 1000 anos | 10000 anos |
| CMCC-CM2-SR5 | SSP5-8.5 | 20.83 | 22.04 | 23.49 | 24.56 | 25.60 | 29.04 | 32.46 |
| | SSP2-4.5 | 20.81 | 22.08 | 23.62 | 24.74 | 25.84 | 29.47 | 33.08 |
| CNRM-ESM2-1 | SSP5-8.5 | 20.99 | 22.22 | 23.71 | 24.80 | 25.87 | 29.39 | 32.90 |
| | SSP2-4.5 | 20.83 | 22.06 | 23.55 | 24.63 | 25.69 | 29.20 | 32.69 |
| GFDL-CM4 | SSP5-8.5 | 21.02 | 22.29 | 23.82 | 24.93 | 26.03 | 29.64 | 33.24 |
| | SSP2-4.5 | 20.67 | 21.89 | 23.37 | 24.44 | 25.50 | 28.97 | 32.44 |
| GISS-E2-I-G | SSP5-8.5 | 20.95 | 22.20 | 23.71 | 24.82 | 25.90 | 29.47 | 33.02 |
| | SSP2-4.5 | 20.90 | 22.17 | 23.70 | 24.82 | 25.92 | 29.53 | 33.13 |
| INM-CM4-8 | SSP5-8.5 | 20.77 | 21.99 | 23.47 | 24.55 | 25.61 | 29.09 | 32.56 |
| | SSP2-4.5 | 20.92 | 22.17 | 23.69 | 24.79 | 25.88 | 29.46 | 33.02 |
| INM-CM5-0 | SSP5-8.5 | 20.94 | 22.15 | 23.62 | 24.68 | 25.73 | 29.19 | 32.63 |
| | SSP2-4.5 | 20.74 | 21.96 | 23.44 | 24.52 | 25.59 | 29.08 | 32.56 |
| IPSL-CM6A-LR | SSP5-8.5 | 20.82 | 22.04 | 23.52 | 24.60 | 25.66 | 29.15 | 32.63 |
| | SSP2-4.5 | 20.38 | 21.48 | 22.81 | 23.78 | 24.73 | 27.86 | 30.98 |
| MPI-ESM1-2-HR | SSP5-8.5 | 20.70 | 21.86 | 23.27 | 24.29 | 25.29 | 28.60 | 31.90 |
| | SSP2-4.5 | 20.93 | 22.19 | 23.72 | 24.83 | 25.92 | 29.51 | 33.09 |
| MRI-ESM2-0 | SSP5-8.5 | 20.91 | 22.13 | 23.61 | 24.69 | 25.74 | 29.23 | 32.70 |
| | SSP2-4.5 | 20.88 | 22.18 | 23.75 | 24.90 | 26.02 | 29.73 | 33.43 |
| | SSP5-8.5 | 21.11 | 22.38 | 23.91 | 25.03 | 26.13 | 29.75 | 33.36 |

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 9 - Comparação das velocidades máximas do vento por período de retorno para cada modelo – parte 1.

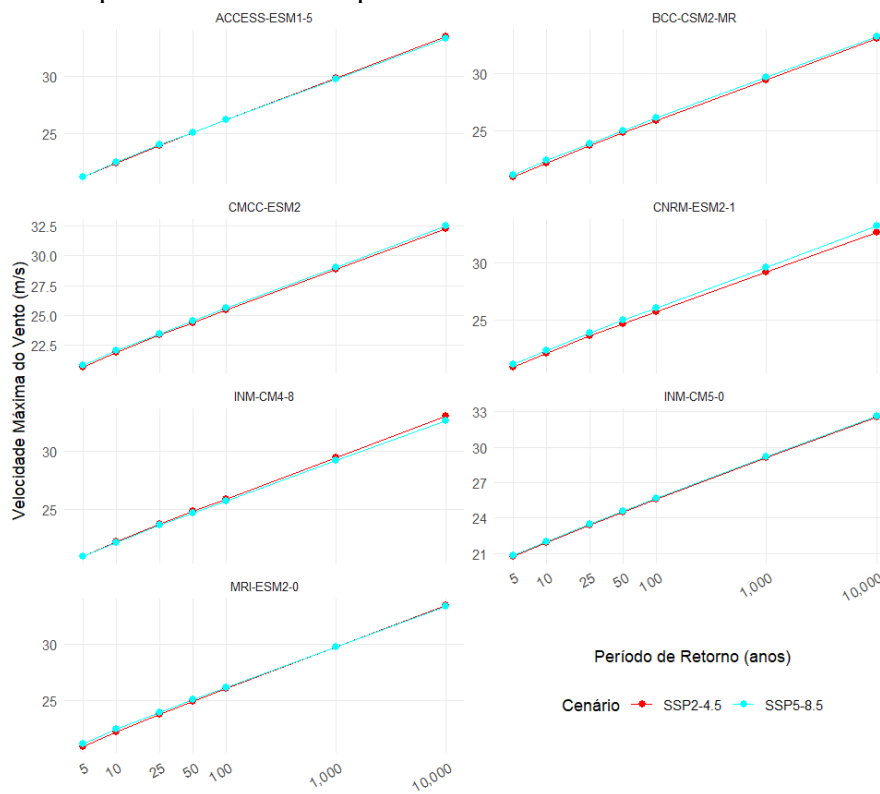
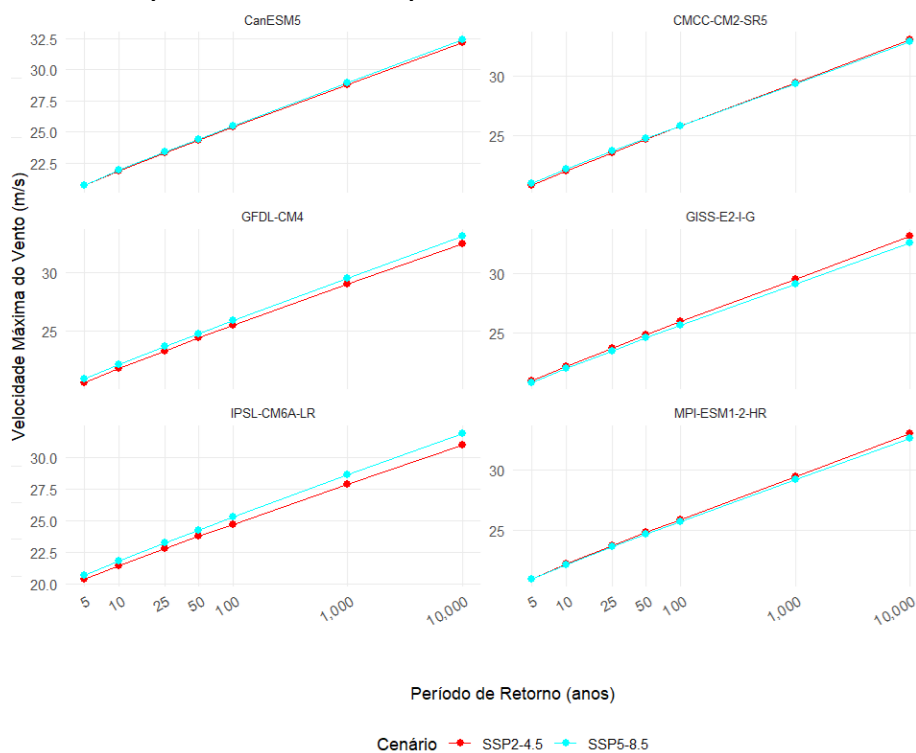


Figura 10 - Comparação das velocidades máximas do vento por período de retorno para cada modelo – parte 2.



A partir dos resultados da Tabela 8, e Figuras 9 e 10, é possível observar que a diferença entre os cenários foi bem sutil. No modelo analisado (GISS-E2-I-G) o cenário SSP2-4.5 apresentou valores maiores de velocidade máxima, enquanto o SSP5-8.5, pior cenário esperado, apresentou valores inferiores. O restante dos modelos apresentou valores próximos entre si, mesmo com a diferença entre cenários. Essa observação pode ser analisada com mais detalhes em pesquisas futuras.

Parte da variabilidade nos resultados pode ser atribuída às diferenças de resolução. Modelos com resolução mais fina (100km) tendem a representar melhor os processos atmosféricos locais e regionais que afetam os ventos extremos (Liu et al., 2023).

A tabela a seguir apresenta os resultados do 90º quantil das velocidades que foram utilizadas como consideração final das velocidades de projeto a serem aplicadas no cálculo final da borda livre.

Tabela 9 - 90º quantil das projeções climáticas de velocidade do vento máxima anual e sua variação percentual em relação ao período observado nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

| Período de Retorno | SSP2-4.5 | | SSP5-8.5 | |
|--------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|
| | Velocidade Máxima (m/s) | Variação Percentual | Velocidade Máxima (m/s) | Variação Percentual |
| 5 | 20.93 | 0.08% | 21.11 | 0.93% |
| 10 | 22.19 | 0.14% | 22.38 | 0.98% |
| 25 | 23.74 | 0.34% | 23.91 | 1.02% |
| 50 | 24.88 | 0.49% | 25.02 | 1.05% |
| 100 | 26.00 | 0.63% | 26.12 | 1.08% |
| 1000 | 29.69 | 1.02% | 29.73 | 1.16% |
| 10000 | 33.37 | 1.33% | 33.31 | 1.19% |

Fonte: elaborado pela autora.

Observa-se que a consideração do 90º quantil não indica uma consideração radical, já que a variação percentual das incertezas é baixa conforme a Tabela 9. Para o dimensionamento da borda livre da barragem, considera-se os valores de velocidade máxima modelados para o pior cenário climático (SSP5-8.5), para cada TR.

3.3.2 *Análise das cheias extremas nos cenários de mudanças climáticas*

O estudo evidenciou como as mudanças climáticas podem impactar o regime hidrológico de uma bacia hidrográfica, podendo causar picos de vazão acima das cheias de projeto aumentando o risco de galgamento da estrutura. No entanto, é comprovado que os

impactos dependem do modelo aplicado para as projeções climáticas e da precisão na resolução dos modelos (Furtado, 2024; Monerie et al., 2020).

A Tabela 10 a seguir apresenta os resultados obtidos a partir dos modelos climáticos que foram utilizados na análise. A modelagem foi conduzida para o período de retorno de 10.000 anos.

Tabela 10 - Elevação da lâmina d'água para TR = 10.000 anos.

| Modelo | Cenários | N.A. (m) |
|-----------------|-----------------|-----------------|
| <i>Baseline</i> | - | 141,82 |
| ACCESS-ESMI 1-5 | SSP2 4.5 | 145,44 |
| | SSP5 8.5 | 147,28 |
| BCC-CSM2-MR | SSP2 4.5 | 145,56 |
| | SSP5 8.5 | 148,32 |
| CanESM5 | SSP2 4.5 | 142,25 |
| | SSP5 8.5 | 142,60 |
| MIROC-ES2L | SSP2 4.5 | 143,56 |
| | SSP5 8.5 | 146,28 |

Fonte: adaptado de Furtado (2024).

Para ser aplicado ao cálculo da borda livre da barragem, foram considerados os modelos climáticos nos quais a elevação da água (N.A.) apresentou elevação acima da cota de coroamento da barragem de Banabuiú (146,0 m). O cenário SSP5 8.5 para os modelos ACCESS-ESMI 1-5, BCC-CSM2-MR e MIROC-ES2L apresentou lâmina d'água superior a cota do coroamento da barragem. Seus respectivos valores: 147,28, 148,32 e 146,28 foram utilizados nesta análise.

3.3.3 *Análise da borda livre final considerando as projeções climáticas*

A Tabela 11 a seguir apresenta as elevações do nível da água calculadas considerando os ventos máximos modelados com os cenários climáticos futuros. O valor do *Fetch* permanece inalterado.

Tabela 11 - Valores calculados a partir da velocidade do vento máxima modelada considerando as mudanças climáticas.

| TR (anos) | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 | 1000 | 10000 |
|--------------------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|--------------|
| U (m/s) | 21.11 | 22.38 | 23.91 | 25.02 | 26.12 | 29.73 | 33.31 |
| S (m) | 0.0058 | 0.0065 | 0.0074 | 0.0081 | 0.0088 | 0.0115 | 0.0144 |
| H _s (m) | 0.697 | 0.748 | 0.810 | 0.856 | 0.903 | 1.059 | 1.221 |
| T (s) | 2.068 | 2.117 | 2.175 | 2.215 | 2.255 | 2.378 | 2.494 |
| R ₂ % | 0.760 | 0.805 | 0.861 | 0.902 | 0.942 | 1.076 | 1.212 |

Fonte: elaborado pela autora.

Ao comparar os valores obtidos pelas metodologias tradicionais (Tabela 6) com os cenários modelados considerando mudanças climáticas (Tabela 11), observa-se que a metodologia ANA tende a produzir resultados mais conservadores, próximos ou superiores aos cenários modelados para períodos de retorno de 1000 anos ou mais.

A metodologia USACE apresenta valores moderados, equivalentes a cenários com TR entre 5 e 10 anos, enquanto a USBR resulta em estimativas consideravelmente inferiores a todos os cenários modelados. Estas diferenças são significativas para o dimensionamento seguro de estruturas hidráulicas, especialmente considerando os efeitos das mudanças climáticas a longo prazo.

É importante destacar que a aplicação do método da USACE com o vento a partir das isopletras (Figura 5), considera um TR de 50 anos. A comparação com o mesmo TR incluindo as mudanças climáticas na velocidade do vento para o TR de 50 anos indica a necessidade de aumentar a borda livre ($0,910 > 0,792$), em relação à USACE, mesmo sem considerar o efeito combinado do aumento de nível da água. A mesma comparação com a USBR não é possível, pois o vento de referência de 10% de não-excedência diária, não pode ser comparado o critério de risco do tempo de retorno.

A utilização exclusiva das fórmulas do USACE para calcular os parâmetros dos cenários de mudanças climáticas (período T, altura significativa Hs e run-up R₂%) introduz um viés metodológico importante na comparação dos resultados, entretanto as variações nos resultados de cada método se dão, em maioria, por conta das diferenças específicas no cálculo da velocidade. A escolha das fórmulas se deu pela sua relevância científica, portanto não limita a robustez da análise comparativa.

A próxima tabela apresenta os valores de borda livre final considerando as previsões de cheias extremas, a partir dos valores modelados com lâmina d'água superior a cota do coroamento da barragem que causariam o galgamento da barragem. Os valores da tabela 12 foram obtidos com a equação 23.

Tabela 12 - Borda Livre Final (m).

| N.A. (m) | Tempo de Retorno (anos) | | | | | | |
|----------|-------------------------|------|------|------|------|------|-------|
| | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 | 1000 | 10000 |
| 147.28 | 5.55 | 5.59 | 5.65 | 5.69 | 5.73 | 5.87 | 6.01 |
| 148.32 | 6.59 | 6.63 | 6.69 | 6.73 | 6.77 | 6.91 | 7.05 |
| 146.28 | 4.55 | 4.59 | 4.65 | 4.69 | 4.73 | 4.87 | 5.01 |

Fonte: elaborado pela autora.

Observa-se que ao combinar os valores de cheia máxima de 10000 anos causada pelas mudanças climáticas, com as elevações causadas pelos ventos em cenários futuros, o valor da borda livre final aumenta em comparação às metodologias de cálculo tradicionais. Mesmo a borda livre real com 3,5 metros abrangendo as incertezas hidrológicas, um cenário futuro considerando as alterações climáticas exige que esse valor seja majorado.

No cenário menos crítico (N.A. de 146,28 m com TR = 5 anos), a borda livre calculada é de 4,55 metros, superando em 1,05 metros a borda livre real. Para o nível d'água intermediário (147,28 m), os valores variam de 5,55 a 6,01 metros, enquanto para o nível mais elevado (148,32 m), a borda livre calculada atinge valores entre 6,59 e 7,05 metros nos eventos extremos com tempo de retorno de 10.000 anos.

3.4 Discussões

Os resultados obtidos neste estudo revelam diferenças significativas entre os métodos tradicionais de dimensionamento da borda livre e a abordagem que incorpora cenários de mudanças climáticas. A modelagem dos dados de velocidade máxima futura possibilitou uma análise robusta de eventos extremos de vento com períodos de retorno bem definidos, o que não seria viável utilizando apenas a série histórica disponível, devido à sua limitada extensão temporal.

A comparação sistemática entre os três métodos tradicionais (USACE, USBR, ANA) revela algumas diferenças que podem apontar a fragilidade conceitual de cada método. É possível inferir que todas consideram apenas ventos habituais nos dimensionamentos, isto é, com períodos de retorno não ultrapassando 100 anos. Isso parte da hipótese de que a cheia máxima não ocorreria simultaneamente a um vento extremo.

Porém, com suas formulações específicas, os resultados da metodologia ANA se aproximam aos cenários modelados para períodos de retorno de 1000 anos, uma abordagem mais conservadora que os demais métodos. Esta convergência, embora não tenha sido originalmente concebida para incorporar cenários climáticos futuros, sugere que a metodologia ANA pode oferecer uma margem de segurança mais adequada diante das incertezas climáticas.

A disparidade entre os métodos pode ser atribuída principalmente às diferentes premissas quanto à definição da velocidade do vento de projeto. O método USBR, ao utilizar a velocidade excedida em 10% das vezes, adota uma abordagem estatística que subestima consideravelmente os eventos extremos quando comparada à velocidade adotada pelo USACE

e ao valor sugerido pela ANA. E mesmo assim, todos assumem implicitamente que os padrões históricos de vento e precipitação permanecerão estáveis ao longo da vida útil da estrutura, uma premissa cada vez mais inválida no contexto atual.

A hipótese de os métodos de cálculo tradicionais assumirem como mínima a probabilidade de ocorrência simultânea de um vento máximo com uma cheia histórica justifica os resultados dos métodos convergindo com períodos de retorno mais curtos, mas preocupa devido ao aumento na frequência de eventos extremos. Este cenário é particularmente preocupante para a Barragem Arrojado Lisboa (Banabuiú), cuja borda livre atual de 3,5 metros, embora adequada segundo os critérios tradicionais, mostra-se insuficiente quando confrontada com os cenários de mudanças climáticas.

Conforme evidenciado na Tabela 12, a combinação dos eventos extremos (precipitação e velocidade do vento com tempo de retorno de 10000 anos) resultou na possibilidade de a borda livre calculada atingir entre 5,01 metros – no cenário mais otimista – e 7,05 metros, mais que o dobro dos 3,5 metros atuais.

Embora as fórmulas tradicionais para cálculo da borda livre considerem a velocidade do vento como fator de influência principal, os resultados revelam uma dinâmica mais complexa. Mesmo com uma análise robusta de projeções futuras de ventos, as elevações causadas pelo vento (*wind setup*) e o avanço das ondas (*wave run-up*) não apresentaram variações notáveis entre os métodos tradicionais e os cenários climáticos quanto o incremento causado pelas cheias extremas projetadas (Tabela 11).

Este resultado é particularmente relevante para o semiárido nordestino, onde a alta variabilidade pluviométrica natural tende a ser amplificada pelas mudanças climáticas, conforme demonstrado por Furtado (2024). Nesse sentido, a atualização das diretrizes de projeto deve priorizar a reconsideração dos métodos de estimativa de cheias extremas sob cenários de mudanças climáticas, considerando a ocorrência conjunta com ventos máximos.

Os achados deste estudo corroboram com tendências similares observadas na literatura internacional. Fluixá-Sanmartin et al. (2021) demonstraram que a incorporação das mudanças climáticas no gerenciamento de riscos de barragens a longo prazo pode revelar vulnerabilidades não identificadas pelos métodos de avaliação tradicionais. De forma similar, Mallakpour, AghaKouchak e Sadegh (2019) apontaram o aumento do risco de falha hidrológica em barragens na Califórnia devido às alterações climáticas projetadas.

Entretanto, diferentemente de estudos anteriores que focam exclusivamente nos regimes de precipitação (Carvalho; Souza Filho; Sabóia, 2020), este trabalho avança ao integrar tanto a variabilidade das precipitações extremas quanto as alterações nos regimes de vento. A

observação de que os ventos extremos não apresentam necessariamente valores maiores proporcionais à severidade do cenário de emissão (com SSP2-4.5 apresentando, em alguns casos, valores maiores ou quase iguais que SSP5-8.5) encontra paralelo nos estudos de Wohland, Folini e Pickering (2021) e Kara e Şahin (2023), que documentaram padrões não lineares na resposta dos regimes de vento às mudanças climáticas. O relatório do IPCC (2021) também apresentou uma diminuição nos dados de velocidade do vento média em várias regiões, mas aumento de eventos extremos de vento (tempestades e ciclones).

Os resultados obtidos para a Barragem Arrojado Lisboa demonstram a aplicabilidade da metodologia proposta em regiões semiáridas, onde os reservatórios caracterizam-se por alta variabilidade sazonal e interanual de volume e área, condições que podem ser encontradas em diversas regiões de clima similar ao redor do mundo. Entretanto, as equações utilizadas para o cálculo do *wind setup* e *wave run-up* foram desenvolvidas e validadas em contextos geográficos e hidrometeorológicos distintos. Com isso ausência de coeficientes específicos para reservatórios com alta variabilidade sazonal de nível d'água e para padrões de vento característicos da região pode introduzir vieses nas estimativas.

Este ponto é particularmente relevante considerando que o fetch efetivo calculado (3,41 km) é relativamente pequeno apesar da grande dimensão do reservatório, o que pode levar a interpretações subestimadas do impacto das ondas. A limitação dos dados históricos de vento disponíveis (série de apenas 17 anos) também constitui outra fonte potencial de incerteza, o que diminui a confiabilidade da análise de extremos e a calibração dos modelos.

A comparação entre métodos convencionais e aqueles que incorporam cenários climáticos evidencia lacunas significativas nas diretrizes vigentes de projeto e segurança de barragens. Esta análise indica a necessidade de atualização das normativas regulatórias, como as estabelecidas pela ANA (2016) no Brasil, que embora mencionem "fatores não quantificáveis devido a várias incertezas", não fornecem metodologia específica para quantificar estas incertezas no contexto de mudanças climáticas.

Os resultados para a Barragem Arrojado Lisboa (Banabuiú) revelam que sua cota atual de coroamento seria insuficiente frente aos cenários climáticos projetados, exigindo intervenções estruturais imediatas como elevação do coroamento ou implementação de estruturas complementares de controle de cheias – um investimento considerável, porém justificável quando comparado ao custo potencial de falhas e à importância estratégica dessas estruturas para a gestão hídrica da região.

3.5 Conclusão

Este estudo demonstrou que a incorporação de cenários de mudanças climáticas no dimensionamento da borda livre de barragens revela vulnerabilidades significativas não capturadas pelos métodos tradicionais. A análise realizada confirma a hipótese inicial de que as metodologias tradicionais subestimam os requisitos de borda livre ao não considerarem adequadamente as alterações climáticas futuras.

O resultado obtido para uma barragem na região do semiárido brasileiro mostrou que as mudanças nos padrões de precipitação extrema, mais que as alterações nos regimes de vento, são o fator predominante para o aumento do requisito de borda livre, e devem ser quantificadas com uma metodologia padrão nas diretrizes vigentes de dimensionamento de barragens.

Este trabalho contribui para a literatura ao integrar, pela primeira vez no contexto do semiárido brasileiro, os impactos das mudanças climáticas nas precipitações extremas e nas alterações dos regimes de vento em uma abordagem metodológica unificada para o cálculo da borda livre. Obter dados dos modelos climáticos do CMIP6 mostrou ser uma boa alternativa para um local com uma série histórica de dados de vento disponível curta.

Futuras pesquisas devem focar na criação de coeficientes específicos para as equações de *setup* do vento e *wave run-up* em reservatórios do semiárido brasileiro. Esses coeficientes devem ser ajustados com medições locais e adaptados às condições morfológicas e climáticas da região. Outro tema de pesquisa futura a ser considerado é como incorporar explicitamente os efeitos das mudanças climáticas no dimensionamento e avaliação de segurança de barragens no contexto das diretrizes regulatórias, pois a implementação destas mudanças regulatórias poderá enfrentar desafios institucionais que devem ser previamente estudados.

Além disso, a ampliação da análise para diferentes barragens ajudaria a identificar padrões de vulnerabilidade e estabelecer diretrizes de segurança em todo o Nordeste, considerando as mudanças climáticas. Por fim, abordagens probabilísticas devem ser incorporadas ao cálculo da borda livre para considerar as incertezas dos modelos climáticos, incluindo a probabilidade e risco associado à ocorrência de eventos conjuntos (*compound events*). Isso possibilitaria a quantificação dos riscos e ajudaria na tomada de decisões.

Em síntese, os resultados deste estudo apontam para a necessidade de atualizar as diretrizes regulatórias para o dimensionamento de barragens, de modo a incluir explicitamente os efeitos das mudanças climáticas. Ainda que os modelos climáticos sejam incertos, a

defasagem entre as práticas atuais e os requisitos reais de segurança representa um risco significativo para infraestruturas críticas.

4 CONCLUSÃO

A presente dissertação abordou criticamente a problemática do dimensionamento da borda livre de barragens no contexto das crescentes incertezas impostas pelas mudanças climáticas, com foco especial na realidade do semiárido nordestino brasileiro. Através de uma abordagem metodológica robusta, que combinou uma revisão sistemática da literatura com um estudo de caso prático, este trabalho não apenas elucidou as lacunas existentes nas práticas tradicionais, mas também quantificou os impactos potenciais das alterações climáticas nos requisitos de segurança dessas estruturas vitais.

O primeiro artigo científico, que constituiu a revisão sistemática, mapeou a evolução das metodologias de cálculo da borda livre, desde suas origens até as abordagens contemporâneas. Foi evidenciado que, apesar da importância da borda livre para a segurança de barragens, especialmente em barragens de terra, grande parte das diretrizes e métodos consolidados foi formulada com base em cenários hidrológicos e meteorológicos históricos. Essa dependência de dados passados, somada à crescente frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, revela uma vulnerabilidade intrínseca nas avaliações de segurança atuais, que implica em uma reavaliação conceitual e prática.

O segundo artigo, focado no estudo de caso da Barragem Arrojado Lisboa (Açude Banabuiú) no Ceará, demonstrou empiricamente as implicações dessa defasagem. A análise comparativa entre as metodologias tradicionais (USACE, USBR e ANA) e uma abordagem que integra cenários de mudanças climáticas futuras revelou diferenças significativas. Constatou-se que os métodos convencionais tendem a subestimar os requisitos de borda livre, principalmente por assumirem implicitamente a estabilidade dos padrões climáticos históricos e uma baixa probabilidade de ocorrência simultânea de cheias máximas e ventos extremos.

Os resultados obtidos para a Barragem do Banabuiú mostraram que a borda livre atual de 3,5 metros, embora considerada adequada pelos critérios tradicionais, mostrou-se insuficiente diante dos cenários climáticos projetados. A modelagem de eventos extremos, combinando precipitações e velocidades de vento com tempos de retorno elevados (até 10.000 anos), indicou a necessidade de uma borda livre que poderia variar entre 5,01 e 7,05 metros, mais que o dobro do valor existente.

Um achado crucial foi que as alterações nos padrões de precipitação extrema, e não as variações nos regimes de vento, emergiram como o fator predominante para o aumento do requisito de borda livre no semiárido brasileiro. Este ponto é vital, pois direciona a atenção para

a necessidade premente de aprimorar os métodos de estimativa de cheias extremas sob cenários de mudanças climáticas.

As contribuições deste estudo são multifacetadas. Primeiramente, ele preenche uma lacuna significativa na literatura nacional, sendo um dos primeiros a integrar de forma unificada os impactos das mudanças climáticas nas precipitações extremas e nos regimes de vento para o cálculo da borda livre no contexto do semiárido brasileiro. A utilização de dados de modelos climáticos do CMIP6 demonstrou ser uma alternativa viável e eficaz para locais com séries históricas de dados de vento limitadas. Em segundo lugar, o trabalho oferece evidências quantitativas robustas que corroboram a necessidade de atualização das diretrizes regulatórias de segurança de barragens no Brasil, como as estabelecidas pela ANA, para que incorporem explicitamente a quantificação das incertezas e os impactos das mudanças climáticas.

Em síntese, os resultados desta dissertação reforçam a necessidade de uma mudança de paradigma no dimensionamento e gestão da segurança de barragens. A defasagem entre as práticas atuais e os requisitos reais de segurança, amplificada pelas alterações climáticas, representa um risco para infraestruturas críticas e para as populações a jusante.

Recomenda-se que futuras pesquisas se concentrem no desenvolvimento de coeficientes específicos para as equações de elevação por vento e avanço de ondas em reservatórios do semiárido, ajustados por medições locais e adaptados às particularidades da região. Além disso, a incorporação de abordagens probabilísticas no cálculo da borda livre, para melhor gerenciar as incertezas dos modelos climáticos, e a ampliação da análise para um conjunto mais diversificado de barragens são passos essenciais para estabelecer diretrizes de segurança abrangentes e resilientes em todo o Nordeste brasileiro.

A adaptação das normativas regulatórias e a superação dos desafios institucionais associados são imperativos para garantir a segurança hídrica e a proteção da vida em um cenário climático em constante transformação.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 13028**: Elaboração e apresentação de projeto de disposição de rejeitos de beneficiamento, em barramento, em mineração. Rio de Janeiro, 1993.
- ABNT. **NBR 13028**: Mineração: elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos. 3. ed. Rio de Janeiro, 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. (Brasil). **Diretrizes para elaboração de projetos de barragens**. 5. ed. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2016b.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. (Brasil). **Guia prático de pequenas barragens**. 8. ed. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2016a.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. (Brasil). **Reservatórios do semiárido brasileiro: hidrologia, balanço hídrico e operação**. Relatório Final. Brasília: ANA, Engecorps Engenharia S.A., 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. (Brasil). **Resolução ANM nº 95**, de 07 de fevereiro de 2022. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2022.
- AHMADISHARAF, Ebrahim; KALYANAPU, Alfred J. **Investigation of the impact of streamflow temporal variation on dam overtopping risk: Case study of a high-hazard dam**. In: THE WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS 2015. Austin, Texas, 2015. p. 1050-1057. Disponível em: <https://doi.org/10.1061/9780784479162.103>. Acesso em: 12 jun. 2025.
- ANCOLD. **Guidelines on tailing dams: Planning, Design, Construction, Operation and Closure**. Revision 1. Austrália: ANCOLD, 2019.
- ASSUNÇÃO, Antonio; MATTOS NETO, Paulo S. G. de; VASCONCELOS, Eduardo. Um sistema baseado em combinação de modelos para previsão de velocidade do vento. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, Recife, v. 7, n. 2, p. 1–11, 15 jul. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.25286/rep.v7i2.2206>. Acesso em: 13 nov. 2024.
- AUSTRALIA. Department of Minerals and Energy. **Guidelines on the safe design and operating standards for tailings storage**. Perth, W.A., Government of Western Australia, 1999.
- AUSTRALIA. Department of Natural Resources and Water. **Guidelines on acceptable flood capacity for dams**. Queensland, Australia: Queensland Government's, 2007.
- BERNEDO, Carmen E.; HADLEY, Lori L.; HAAPALA, John C. **Am I underestimating or overestimating my dam freeboard design?** In: WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS 2008. Ahupua'a, Honolulu, Hawaii, United States, 2008. p. 1-13. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/40976\(316\)242](https://doi.org/10.1061/40976(316)242). Acesso em: 17 mai. 2023.

BOCCHIOLA, Daniele; ROSSO, Renzo. Safety of Italian dams in the face of flood hazard. **Advances in Water Resources**, [S. l.], v. 71, p. 23-31, 2014. ISSN 0309-1708, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.05.006>. Acesso em: 14 jun. 2025.

BOCK, L. et al. Quantifying progress across different CMIP phases with the ESMValTool. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Switzerland, v. 125, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2019JD032321>. Acesso em: 14 jun. 2025.

BUREAU OF INDIAN STANDARDS. **Freeboard requirements in embankment dams: Guidelines**. (IS 10635). New Delhi, India: Indian Standards, 1993.

BUTCHER, Jonathan B. et al. Efficient statistical approach to develop intensity-duration-frequency curves for precipitation and runoff under future climate. **Climatic Change**, [S. l.], v. 164, n. 1–2, 1 jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-021-02963-y>. Acesso em: 2 jul. 2025.

CARNEIRO, B. L. D. S.; SOUZA FILHO, F. A. de; CARVALHO, T. M. N.; RAULINO, J. B. S. Hydrological risk of dam failure under climate change. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, RS, v. 27, ed. 19, 29 jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.272220220017>. Acesso em: 24 abr. 2023.

CARVALHO, T. M. N.; SOUZA FILHO, F. A. D.; BRITO, M. M. Unveiling water allocation dynamics: a text analysis of 25 years of stakeholder meetings. **Environmental Research Letters**, [S. l.], v. 19, n. 4, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad37cd>. Acesso em: 23 jan. 2025.

CARVALHO, T. M. N.; SOUZA FILHO, F. D. A.; SABÓIA, M. A. M. Performance of rainwater tanks for runoff reduction under climate change scenarios: a case study in Brazil. **Urban Water Journal**, United Kingdom, v. 17, n. 10, p. 912-922, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1846063>. Acesso em: 15 jan. 2025.

CINS. **Boletim Oficial del Estudio**. Comision Interministerial de Normas Sismorresistentes. P.G., S-1. Madrid: Instituto Geografico y Cadastral, 1968.

DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. Water wave mechanics for engineers and scientists. **Advanced Series on Ocean Engineering**, volume 2. Florida, World Scientific, 1992. p. 368.

DEGU, A. et al. The influence of large dams on surrounding climate and precipitation patterns. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 38, n. 4, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2010gl046482>. Acesso em: 2 jul. 2025.

ELETROBRAS. **Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas**. Brasília, DF, 2003. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Manuais-e-Diretrizes-para-Estudos-e-Projetos.aspx>. Acesso em: 27 abr. 2024.

ELETROBRAS. **Diretrizes para projetos de pequenas centrais hidrelétricas**. Brasília, DF, 1999. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Manuais-e-Diretrizes-para-Estudos-e-Projetos.aspx>. Acesso em: 27 abr. 2024.

ELETROBRAS. **Segurança de barragens hidrelétricas**. Série especial 60 anos Eletrobras, 2022. [Locução de] Adriana de Broux, Brasília, DF. Podcast. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/paginas/historia.aspx>. Acesso em: 27 abr. 2024.

EYRING, V. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development**, [S. l.], v. 9, p. 1937-1958, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>. Acesso em: 2 jul. 2025.

FANG, G. H. et al. Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for hydrologic impact study in an arid area in China. **Hydrology Earth System Science Discussions**, [S. l.], v. 11, p. 12659–12696, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-19-2547-2015>. Acesso em: 18 mar. 2025.

FLUIXÁ-SANMARTÍN, J. et al. Accounting for climate change uncertainty in long-term dam risk management. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Virginia, v. 147, n. 4, 2021. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001355](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001355). Acesso em: 12 jun. 2025.

FLUIXÁ-SANMARTÍN, J. et al. Quantification of climate change impact on dam failure risk under hydrological scenarios: a case study from a Spanish dam. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 19, n. 10, p. 2117–2139, 1 out. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/nhess-19-2117-2019>. Acesso em: 4 set. 2023.

FURTADO, F. A. **Avaliação do impacto das mudanças climáticas na segurança de barragens**: Estudo de caso da barragem banabuiú. 2024. 68 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/76985>. Acesso em: 5 set. 2024.

GHIMIRE, S.; SCHULENBERG, J. Impacts of climate change on the environment, increase in reservoir levels, and safety threats to earthen dams: Post failure case study of two cascading dams in Michigan. **Civil and Environmental Engineering**, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 551-564, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.2478/cee-2022-0053>. Acesso em: 2 jul. 2025.

GUIDICINI, G.; SANDRONI, S. S.; MELLO, F. M. de. **Lições aprendidas com acidentes e incidentes em barragem e obras anexas no Brasil**. Rio de Janeiro: CBDB, 2021, 207 p. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/Acervo/Detalhe/91250. Acesso em: 20 jan. 2025.

HERBOZO, Jorge Enrique et al. Non-stationary hydrological regimes due to climate change: the impact of future precipitation in the spillway design of a reservoir, case study: Sube Y Baja Dam, in Ecuador. **Atmosphere**, Switzerland, v. 13, n. 828, 1 mai. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos13050828>. Acesso em: 13 nov. 2024.

HUBER, A.; HAGER, W. H. **Forecasting impulse waves in reservoirs**. In: ICOLD CONGRESS, 18., Florence, 1997. p. 993-1005.

ICMM. **Tailings management**: Good practice guide. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.icmm.com/en-gb/guidance/innovation/2021/tailings-management-good-practice>. Acesso em: 19 mar. 2024.

ICOLD. **Dam safety**: Guidelines. Paris, France, 1987. (Bulletin nº 59).

ICOLD. **Manual on tailings dams and dumps**. Paris, France, 1982. (Bulletin nº 45).

ICOLD. **Small dams**: Design, surveillance and rehabilitation. Paris, France, 2011. (Bulletin nº 157).

ICOLD. **Statistical analysis of dam failures**. Paris, France, 2019. (Bulletin nº 188).

ICOLD. **Tailings dam safety**: Guidelines. Paris, France, 1989. (Bulletin nº 74).

ICOLD. **Technical dictionary on dams**. Paris, France: ICOLD, 1978.

INDIA. Central Water Commission. **Analysis and design aspects of embankment dams**. Pune, India: Government of India, 2019.

IPCC. **Sumário para formuladores de políticas**. In: MUDANÇA do Clima 2023: Relatório Síntese. Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. Genebra, 2023. p. 1-34. Disponível em: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>. Acesso em: 07 jan. 2025.

IPCC. **Sumário para formuladores de políticas**. In: MUDANÇA do Clima 2021: A Base da Ciência Física. Contribuição do Grupo de Trabalho I ao Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Cambridge, Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>. Acesso em: 07 jan. 2025.

KARA, T.; ŞAHIN, A. D. Implications of climate change on wind energy potential. **Sustainability**, Switzerland, v. 15, n. 20, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su152014822>. Acesso em: 07 jan. 2025.

KUMAR, Rohit; MISHRA, S. Kumar; KUMAR, D. Situational awareness based operational reliability of wind energy system incorporating uncertainties. **Research Square**, [S. l.], preprint (version 1), 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2063539/v1>. Acesso em: 2 jul. 2025.

LI, Haibin; SHEFFIELD, Justin; WOOD, Eric F. Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, [S. l.], v. 115, n. 10, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2009JD012882>. Acesso em: 16 mai. 2025.

LIMA, G. C. **Explorando as tendências climáticas da velocidade do vento no Brasil (1961-2020) e propondo um modelo híbrido para previsões**. 2024. 135 p. Tese (Doutorado em Ciências Climáticas) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/58235>. Acesso em: 13 nov. 2024.

LIU, Laibao et al. Climate change impacts on planned supply–demand match in global wind and solar energy systems. **Nature Energy**, [S. l.], v. 8, n. 8, p. 870–880, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41560-023-01304-w>. Acesso em: 4 mar. 2025.

LOREDO-SOUZA, Acir Mércio et al. A climatology-based wind speed map for NBR 6123. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 16, n. 4, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952023000400001>. Acesso em: 20 set. 2024.

MAGALHÃES, D. A. de; CRUZ, F. F. de Souza. Climatic and human body system: concepts of the physics of complex systems to the classroom. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 43, p. 1–9, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0460>. Acesso em: 12 jun. 2025.

MALLAKPOUR, I.; AGHAKOUCHAK, A.; SADEGH, M. Climate-induced changes in the risk of hydrological failure of major dams in California. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 46, n. 4, p. 2130-2139, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2018gl081888>. Acesso em: 2 jul. 2025.

MARENGO, José A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI**. 2. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007. ISBN 85-7738-038-6.

MARQUES, M. **Modelagem paramétrica bidimensional para simulação do campo de ondas em águas continentais**. 2013. 217 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/xmlui/handle/1884/41806>. Acesso em: 14 mar. 2024.

MARTINS, R. **A folga em barragens: memória no. 828**. Lisboa, LNEC, 2002.

MEEHL, G. A. et al. The Coupled Model Intercomparison Project (CMIP). **Bulletin of the American Meteorological Society**, [S. l.], v. 81, n. 2, p. 313-318, 2000. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/26215108>. Acesso em: 14 jun. 2025.

MEER, J. W. van der; JANSSEN, J. P. **Wave run-up and wave overtopping at dikes and revetments**. Emmeloord, Netherlands: Delft Hydraulics, 1994, 485 p.

MIELE, Eric Stefan; LUDWIG, Nicole; CORSINI, Alessandro. Multi-horizon wind power forecasting using multi-modal spatio-temporal neural networks. **Energies**, [S. l.], v. 16, n. 8, 1 abr. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16083522>. Acesso em: 2 jul. 2025.

MIRANDA, Vanessa C. P. et al. Análise de dados na flutuação horária da velocidade do vento na região Nordeste. **SBA Sociedade Brasileira de Automática**, Campinas, v. 3, n. 1, p. 149-156, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.20906/CBA2022/3195>. Acesso em: 13 nov. 2024.

MONERIE, P. et al. Role of atmospheric horizontal resolution in simulating tropical and subtropical south american precipitation in hadgem3-gc31. **Geoscientific Model Development**, [S. l.], v. 13, n. 10, p. 4749-4771, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/gmd-13-4749-2020>. Acesso em: 2 jul. 2025.

NIETSCHKE, M. L. **Avaliação das condições de manutenção e segurança das barragens e eclusas do Fandango, Anel de Dom Marco, Amarópolis e Bom Retiro no Estado do Rio Grande do Sul**. 2022. 106 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia

Civil) – Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2022. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11624/3386>. Acesso em: 8 nov. 2024.

NOBRE, M. R. P.; PEREIRA, M. S.; CAMPOS, R. Study of maximum flows of project using a Gumbel distribution. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 12, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i12.20098>. Acesso em: 28 fev. 2025.

O'NEILL, Brian C. et al. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. **Geoscientific Model Development**, [S. l.], v. 9, n. 9, p. 3461–3482, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>. Acesso em: 8 jan. 2025.

OLIVEIRA, Luísa Ciríaco Silva de. **Simulação do rompimento de barragens na bacia hidrográfica do Banabuiú-CE**. 2018. 91 f. Monografia(Graduação em Engenharia Civil)-Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

OZBAHCECI, Berguzar O.; BILYAY, Engin. Effect of the armor crest freeboard relative to the crown wall freeboard on wave overtopping for simple rubble mound slopes. **Ocean Engineering**, [S. l.], v. 169, p. 511–528, 1 dez. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.09.043>. Acesso em: 22 nov. 2024.

PAGE, Matthew J. et al. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. **The BMJ**, [S. l.], v. 372, n. 72, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1136/bmj.n71>. Acesso em: 22 nov. 2024.

PEREIRA, M. F. R.; AMORIM, P. B. de; CHAFFE, P. L. B. **Correção de viés da precipitação de modelos de clima do CMIP5 na bacia do Rio Itajaí**. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS, Porto Alegre, 2018.

PEREIRA, J. M. R. et al. Use of climate information in water allocation: a case of study in a semiarid region. **Water**, Switzerland, v. 15, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w15132460>. Acesso em: 23 jan. 2025.

PEREIRA, R. C.; STUDART, T. M. C. Segurança de barragens e a borda livre: uma revisão sistemática das abordagens e evoluções metodológicas. **Revista Brasileira De Geografia Física**, Recife, v. 18, n. 3, p. 2157-2177, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v18.3.p2157-2177>. Acesso em: 2 abr. 2025.

PERINI, D. S. **Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra**. 2009. 149 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2009.

POHL, R. **Freeboard allowance at rivers: experiences from Germany**. In: RIVER FLOW, 2014. Germany: CRC Press, 2014.

PONTES FILHO, João Dehon et al. Copula-based multivariate frequency analysis of the 2012-2018 Drought in Northeast Brazil. **Water**, Switzerland, v. 12, n. 3, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w12030834>. Acesso em: 7 jan. 2025.

QUELOPANA, Hugo; BARRERA, Sergio. **A Definition of Freeboard**. In: 3RD INTERNATIONAL SEMINAR ON TAILINGS MANAGEMENT – TAILINGS 2015. Santiago, Chile, 2015. p. 12.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 28 fev. 2025.

RAPHALDINI, Breno et al. Normal mode perspective on the 2016 QBO Disruption: evidence for a basic state regime transition. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 47, n. 14, 28 jul. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2020GL087274>. Acesso em: 12 nov. 2024.

ROCHA, Paulo Alexandre Costa et al. Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil. **Applied Energy**, [S. l.], v. 89, n. 1, p. 395–400, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.003>. Acesso em: 8 nov. 2024.

RODRIGUES, B. D. et al. Uma análise sobre as chuvas no Ceará baseada nos eventos de El Niño, La Niña e no Dipolo do Servain durante a estação chuvosa. **Revista Brasileira De Climatologia**, [S. l.], v. 28, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/rbclima.v28i0.76238>. Acesso em: 2 jul. 2025.

SALVIANO, M. F.; GROppo, J. D.; PELLEGRINO, G. Q. Análise de tendências em dados de precipitação e temperatura no Brasil. **Revista Brasileira De Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 31, n. 1, p. 64-73, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-778620150003>. Acesso em: 2 jul. 2025.

SANCOLD. **Guidelines on freeboard for dams**. South Africa, 1990. (Report no. 3).

SANCOLD. **Guidelines on freeboard for dams**. South Africa: Water Research Commission, 2011.

SANTOS, D. N. et al. Estudo de alguns cenários climáticos para o Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira De Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 5, p. 492-500, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1415-43662010000500006>. Acesso em: 2 jul. 2025.

SAVILLE, T. **The effect of fetch width on wave generation**. Denver, Colorado: Beach Erosion Board, Corps of Engineers, 1954. (Technical memorandum no. 70).

SAVILLE, T. **Wind set-up and waves in shallow water**. Denver, Colorado: Beach Erosion Board, Corps of Engineers, 1952. (Technical memorandum no. 27).

SAVILLE, T.; MCCLENDON, E. W.; COCHRAN, A. L. Freeboard allowances for waves in inland reservoirs. **Journal of the Waterways and Harbors Division**, [S. l.], v. 88, n. 2, 1962. Disponível em: <https://doi.org/10.1061/J+WHEAU.0000281>. Acesso em: 10 abr. 2024.

SILVA, Francisco Jeandson Rodrigues da et al. Fatores de forma e de escala da distribuição de probabilidade Weibull: um estudo de caso para dados de recursos eólicos da região nordeste do Brasil. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, [S. l.], v. 12, n. 1, p. 229-239, 2020.

SOARES, L. **Barragem de rejeitos**. *In*: BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Tratamento de Minérios. 5 ed. Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia Mineral, 2010. p.831-896.

SVERDRUP, H.; MUNK, W. **Wind, sea, and swell: Theory of relations for forecasting**. California, U.S.: U.S. Hydrographic Office, 1947. (Technical report number 1).

TESSEMA, N. N. **Physical modelling of dam overtopping from landslide generated waves**. 2020. 86 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Addis Ababa University, Addis Ababa, Ethiopia, 2020.

TESSEMA, N. N.; LIA, Leif; JABIR, A. K.; SIGTRYGGSDOTTIR, F. G. **The impact of freeboard on embankment dams**. *In*: HYDROAFRICA 2017. Marrakesh, Morocco. 2017. p. 10.

THE ROCK MANUAL. **The Rock Manual: the use of rock in hydraulic engineering**. 2. ed. London: CIRIA; CUR; CETMEF, 2007.

USACE. **Coastal Engineering Manual**. Washington, DC: Office of the Chief of Engineers, 2006. (EM 1110-2-1100).

USACE. **Coastal Engineering Manual**. Washington, DC: Office of the Chief of Engineers, 2008. (EM 1110-2-1100).

USACE. **Coastal Engineering Manual**. Washington, DC: Office of the Chief of Engineers, 2011. Part 6 (EM 1110-2-1100).

USACE. **Hydrologic engineering requirements for reservoirs**. Washington, DC: Office of the Chief of Engineers, 1997. (EM 1110-2-1420).

USACE. **Hydrologic engineering requirements for reservoirs**. Washington, DC: Office of the Chief of Engineers, 2018. (EM 1110-2-1420).

USACE. **Inflow design floods for dams and reservoirs**. Washington, DC, 1991. (ER 1110-8-2).

USACE. **Recommended guidelines for safety inspection of dams**. Washington, DC: Office of the Chief of Engineers, 1979. (ER 1110-2-106).

USACE. **Storm surge analysis and design water level determinations**. Washington, DC: Office of the Chief of Engineers, 1986. (EM 1110-2-1412).

USACE. **Water levels and wave heights for coastal engineering design**. Washington, DC: Office of the Chief of Engineers, 1989. (EM 1110-2-1414).

USACE. **Wave runup and wind setup on reservoir embankments**. Washington, DC, 1976. (EM 1110-2-221). (Engineering Technical Letter).

USACE. **Waves in inland reservoirs**. Washington, DC: Beach Erosion Board, 1962. (No. 132).

USBR. **Design standards no 13: Embankment dams**. Denver, Colorado: Technical Service Center, 2012. (DS-13(6)-2).

USBR. **Freeboard criteria and guidelines for computing freeboard allowances for storage dams**. Denver, Colorado: Assistant Commissioner - Engineering and Research, 1981. (No. 2).

USBR. **Freeboard criteria and guidelines for computing freeboard allowances for storage dams**. Revised. Denver, Colorado: Assistant Commissioner - Engineering and Research, 1992. (No. 2).

VALE. **Manual de barragens e estrutura de armazenamento de rejeitos (EARs) da Vale**. Brasília, DF, 2024. Disponível em: <https://vale.com/pt/biblioteca-de-documentos>. Acesso em: 7 maio 2024.

VALLIS, Matthew Bruce. **Brazilian extreme wind climate**. 2019. 414 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

VILHENA, R. et al. Estimating the wind-generated wave erosivity potential: the case of the Itumbiara dam reservoir. **Water**, Switzerland, v. 11, n. 2, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w11020342>. Acesso em: 14 jan. 2025.

WAN ARIFFIN, Wan Noorul Hafilah et al. Overtopping risk of high-hazard embankment dam under climate change conditions. **PLoS ONE**, [S. l.], v. 20, n. 2, 1 fev. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0311181>. Acesso em: 7 maio 2024.

WATER RESEARCH COMMISSION. **Guidelines on freeboard for dams: Literature Review and Case Studies**. Stellenbosch, África do Sul: University of Stellenbosch, 2011.

WILBY, R. L.; WIGLEY, T. M. L. Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. **Progress in Physical Geography**, [S. l.], v. 21, n. 4, p. 530-548, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/030913339702100403>. Acesso em: 21 mar. 2025.

WOHLAND, J.; FOLINI, D.; PICKERING, B. Wind speed stilling and its recovery due to internal climate variability. **Earth System Dynamics**, [S. l.], v. 12, p. 1239-1251, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/esd-12-1239-2021>. Acesso em: 2 jul. 2025.

ZHANG, F. et al. Evaluation and projection of extreme high temperature indices in southwestern China using NEX-GDDP-CMIP6. **Journal of Meteorological Research**, [S. l.], v. 38, n. 1, p. 88-107, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13351-024-3059-4>. Acesso em: 14 jan. 2025.

ZHANG, L. M.; XU, Y.; JIA, J. S. Analysis of earth dam failures: a database approach. **Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards**. Shanghai, China, v. 3, n. 3, p. 184-189, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17499510902831759>. Acesso em: 11 mai. 2023.

ZHANG, Zhehua et al. Research and analysis of global weather extremes affecting civil engineering construction schedules based on LSTM algorithm. **Journal of Environmental Science Studies**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 16, 11 de maio de 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.20849/jess.v5i1.1182>. Acesso em: 14 jan. 2025.