

MATEUS YUKIO TAGATA

**AVALIAÇÃO DE ESTUDOS HIDROLÓGICOS NA SEGURANÇA
DE BARRAGENS – ESTUDO DE CASO NA BARRAGEM
APERTADO-BA**

Artigo Científico apresentado ao Curso de Especialização em Segurança de Barragens. Programa de Pós-Graduação em Segurança de Barragens; Escola Politécnica; Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Especialista.

Orientadora: Profa. Dra. Cássia Juliana Fernandes Torres

Salvador
2024

AVALIAÇÃO DE ESTUDOS HIDROLÓGICOS NA SEGURANÇA DE BARRAGENS – ESTUDO DE CASO NA BARRAGEM APERTADO-BA

Mateus Yukio Tagata

Resumo

Considerando os desafios impostos pelas mudanças climáticas e o crescimento populacional, a gestão eficiente dos recursos hídricos emerge como uma necessidade premente. Nesse contexto, as barragens desempenham um papel crucial na oferta de água para múltiplos fins. Contudo, a segurança dessas estruturas é uma preocupação central, especialmente diante do aumento das chuvas extremas observado em várias regiões do mundo. Estudos indicam um aumento das chuvas extremas, aumentando os riscos de inundações e danos às barragens. Desta forma, esta obra tem como objetivo avaliar a importância das revisões periódicas nos estudos hidrológicos para a segurança das barragens, tendo como estudo de caso a atualização dos estudos hidrológicos da barragem Apertado no rio Paraguaçu, Estado da Bahia. A pesquisa foi desenvolvida utilizando o método *Soil Conservation Service* - SCS para produção do hidrograma de projeto da barragem a partir de informações pluviométricas da região. Os resultados da análise indicam que a barragem Apertado demonstra uma capacidade adequada para lidar com eventos extremos de precipitação, mesmo considerando um período de retorno de dez mil anos. Estes resultados sugerem que, até o momento, as mudanças climáticas não apresentam um impacto significativo que comprometa a segurança da barragem.

Palavras-chave: Segurança de barragens; Hidrologia; Mudanças climáticas.

Abstract

Given the challenges posed by climate change and population growth, efficient water resources management emerges as a pressing need. In this context, dams play a crucial role in providing water for multiple purposes. However, the safety of these structures is a central concern, especially in the face of the increased occurrence of extreme rainfall observed in various regions of the world. Studies indicate a rise in extreme rainfall events, increasing the risks of floods and damage to dams. Thus, this work aims to assess the importance of periodic revisions in hydrological studies for dam safety, focusing on the update of hydrological studies of the Apertado dam on the Paraguaçu River, Bahia State, Brazil. The research was conducted using the Soil Conservation Service (SCS) method to produce the dam's design hydrograph based on rainfall data from the region. The analysis results indicate that the Apertado dam demonstrates adequate capacity to handle extreme precipitation events, even considering a return period of ten thousand years. These findings suggest that, thus far, climate change does not pose a significant impact compromising the dam's safety.

Keywords: Dam safety; Hydrology; Climate change.

1. INTRODUÇÃO

A gestão eficiente dos recursos hídricos é uma questão de crescente importância em um mundo onde as mudanças climáticas e o crescimento populacional impõem desafios significativos para a garantia da disponibilidade hídrica. Nesse contexto, as barragens desempenham um papel crucial na provisão de água para abastecimento, produção de energia, irrigação e controle de cheias. Contudo, a segurança dessas estruturas é uma preocupação central pois também sofrem as influências das mudanças climáticas e das demandas hídricas de uma população crescente, exigindo assim constantes revisões e aprimoramentos.

Segundo pesquisa desenvolvida em junho de 2021 em colaboração com pesquisadores das universidades de Newcastle, East Anglia (UEA) e Tyndall Centre, do Reino Unido, e divulgado através do domínio virtual do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), mais de 170 artigos científicos sobre o tema mudanças climáticas e sua relação com as chuvas extremas confirmam: A mudança climática aumenta a frequência e intensidade de chuvas extremas porque uma atmosfera mais quente retém mais vapor d'água, que pode se transformar em chuva, às vezes em um curto período de tempo.

Aumentos em chuvas extremas têm sido observados em muitas partes do mundo. Chuvas extremas, por sua vez, podem aumentar a chance de ocorrência de inundações e sua magnitude em áreas pequenas e urbanas, impactando severamente populações locais, infraestruturas e construções de contenção e regulação de corpos hídricos, a exemplo de barragens. As chuvas extremas e os riscos de inundação associados têm projeção de aumento à medida que as temperaturas globais continuam a subir.

Corroborando com tais afirmações, os estudos coordenados por Marengo (2022) avaliaram as condições meteorológicas no período de novembro a dezembro de 2021, com destaque para os dias 22 a 29 de dezembro, na região do sul da Bahia e norte de Minas Gerais. Os resultados revelaram um padrão de chuvas excepcional, com precipitações excedendo em até 300 mm a média histórica para o período. Essa anomalia pluviométrica levantou questionamentos sobre mudanças significativas no regime de chuvas da região pois estas, desencadearam inundações generalizadas, afetando comunidades inteiras e resultando em eventos como o colapso de barragens e danos econômicos substanciais. Dois anos após o ocorrido em 2021, igualmente no mês de dezembro, o boletim pluviométrico de janeiro de 2024 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) informou que Salvador-BA registrou 85,9 milímetros (mm) de chuva na estação meteorológica convencional localizada na capital baiana. Segundo o boletim, o valor ficou 35% acima da média climatológica de 1991-2020 (média histórica), que é de 63,4 mm.

Certamente, a repetição desses dois eventos, embora com proporções distintas, indica uma tendência à reprodutibilidade. Essa recorrência levanta sérias dúvidas sobre a previsibilidade e a possibilidade desses eventos se tornarem mais frequentes no futuro. É evidente que o padrão de chuvas na região está passando por uma transformação significativa, o que aumenta as preocupações em relação à segurança e à resiliência das comunidades locais diante dessas mudanças climáticas. Perante tal tendência e considerando que uma fração das chuvas é convertida em escoamento direto superficial, a revisão de vazões de projeto em barragens emerge como uma necessidade crítica, alinhada às preocupações contemporâneas de prevenção e defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais.

Considerando que a chuva é a principal variável climática no dimensionamento de obras hidráulicas, a necessidade de revisões nos estudos hidrológicos para garantir a segurança de barragens se torna evidente. Para projetar e construir estruturas hidráulicas, é essencial ter conhecimento do hidrograma de projeto, que proporciona informações sobre o volume do escoamento superficial direto e a vazão

máxima esperada para um determinado período de retorno (SILVEIRA, 2010). Nesse contexto, a análise do padrão de chuvas excepcionais observado na região do sul da Bahia e norte de Minas Gerais, conforme relatado nos estudos coordenados por Marengo (2022), ressalta a importância de revisar as vazões de projeto em barragens. A recorrência desses eventos extremos levanta sérias preocupações sobre a segurança e a resiliência das estruturas existentes, destacando a necessidade urgente de adaptação às novas realidades climáticas.

Especialistas que se dedicam a compreender as principais causas de ruptura de barragens concordam que o galgamento figura como a segunda maior causa de colapso dessas estruturas. De acordo com Foster et al. (1998), análises estatísticas apontam que os incidentes mais comuns relacionados à segurança de barragens de terra incluem a erosão interna e o galgamento. Jansen (1988), ao estudar 41 casos de rupturas de barragens em diferentes países, inclusive o caso de Orós, no Brasil, constatou que 23% delas foram causadas por galgamento, resultante de cheias excepcionais subestimadas, o que o coloca como a segunda principal causa de rompimento de barragens. Diante disso, há uma preocupação significativa em relação à elaboração ou revisão dos estudos hidrológicos, especialmente considerando as mudanças ao longo do tempo nas séries históricas de chuvas.

A Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei Federal Nº 12.334/2010) fundamenta a necessidade de revisões periódicas, estabelecendo a responsabilidade do empreendedor na manutenção da segurança das estruturas hidráulicas. Apesar de ser relativamente recente, a referida Lei já foi alvo de modificações pela Lei nº 14.066/2020, que promoveu alterações significativas também nas regulamentações complementares, buscando prevenir a ocorrência e reduzir a magnitude de desastres como os mencionados.

Na Política Nacional de Segurança de Barragens, a revisão do estudo hidrológico está contemplada na Revisão Periódica de Segurança de Barragem, abordada no artigo 10, com o objetivo de verificar o estado geral de segurança da barragem. Isso inclui a atualização dos dados hidrológicos. No estado da Bahia, especificamente, a Revisão Periódica de Segurança de Barragem é regulada pela Portaria INEMA Nº 4.672 de 28 de março de 2013, nos artigos 11, 12, 13 e 14. Segundo a Portaria, a periodicidade mínima da atualização dos estudos hidrológicos é definida a partir da Matriz de Categoria de Risco e Dano Potencial associado à barragem. Nessa matriz, os barramentos são classificados em letras, de A a D, em uma ordem hierárquica, onde a classificação "A" é atribuída à combinação mais crítica, ou seja, quando tanto o Dano Potencial Associado quanto a Categoria de Risco são altos, enquanto a classificação "D" é atribuída à combinação menos crítica.

Caso a barragem se classifique como A ou B, a primeira Revisão deve ocorrer em 5 (cinco) anos e a partir da segunda a cada 10 (dez anos); Caso a classificação seja C ou D, a cada 10 anos. Considerando que as séries históricas de dados hidrológicos podem ser influenciadas por mudanças nas condições climáticas ao longo do tempo, é importante ressaltar a necessidade de revisar regularmente essas séries para assegurar a segurança das barragens. A variação nas características hidrológicas, tais como padrões de precipitação, níveis de água e vazões dos rios, como os observados em eventos recentes no Estado da Bahia, pode ter um impacto significativo no comportamento hidráulico das barragens nesta região, afetando assim sua estabilidade e capacidade de armazenamento de água. Neste sentido, o objetivo central do trabalho consiste em avaliar a relevância de revisões nos estudos hidrológicos para segurança de barragens, tendo como estudo de caso a atualização dos estudos hidrológicos da barragem Apertado no rio Paraguaçu, Estado da Bahia.

Diante do objetivo exposto, a presente pesquisa se justifica pela necessidade imperativa de promover a segurança das barragens e a sustentabilidade hídrica continuamente, em consonância com os princípios constitucionais e normativos vigentes.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O capítulo de revisão de literatura busca fornecer uma sólida fundamentação teórica para o desenvolvimento dos estudos hidrológicos propostos, concentrando-se na análise crítica da literatura existente sobre a revisão de vazões de projeto de barragens. Serão explorados estudos, pesquisas e normativas relacionadas à hidrologia e a segurança de barragens, com o objetivo de atualizar o hidrograma de projeto da barragem Apertado e identificar se os eventos recentes de chuva intensa comprometem a segurança dessa barragem.

2.1. Política Nacional de Segurança de Barragens

A história da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) se entrelaça com o desenvolvimento da legislação ambiental no Brasil ao longo do tempo. A reorganização legislativa ambiental teve início na década de 1980 com a promulgação da Lei da Política Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6.938/1981). No entanto, antes mesmo desse marco, já existiam normas específicas que regulavam o uso dos recursos naturais e protegiam áreas de vegetação, como os Códigos de Águas, de Minas, Florestal, de Pesca e a Lei de Proteção à Fauna, estabelecidos desde o início do século XX e até mesmo antes. A Constituição Federal de 1988 impulsionou ainda mais a temática ambiental, conferindo direito a um meio ambiente ecologicamente equilibrado a todos os cidadãos, por meio do artigo 225. Esse contexto estimulou a elaboração de novas normas ambientais nas décadas de 1990 e início dos anos 2000, contribuindo para a consolidação e aprimoramento da legislação ambiental no país. A PNSB surge como parte desse processo evolutivo, refletindo o compromisso do Brasil com a segurança das barragens e a proteção dos recursos hídricos.

Nesse cenário, conforme ressalva a Consultoria Legislativa da Câmara dos Deputados (2021), as regulamentações referentes à segurança de barragens têm passado por revisões constantes nos últimos anos, especialmente após os incidentes de ruptura que ocorreram desde o final do século passado, ganhando maior atenção a partir de meados da década de 2010 com os desastres envolvendo a Samarco Mineração, em Mariana/MG, em 5 de novembro de 2015, e a Vale, em Brumadinho/MG, em 25 de janeiro de 2019. Esses rompimentos resultaram na atualização da PNSB que, apesar de ser relativamente recente, já foi alvo de modificações pela Lei nº 14.066/2020, evidenciando a necessidade contínua de aprimoramento das políticas de segurança de barragens no país.

2.2. O papel da hidrologia na segurança de barragens

Compreender a hidrologia é fundamental para garantir a segurança das barragens, constituindo um fator indispensável na preservação da vida, do meio ambiente e do patrimônio. Nesse contexto, o estudo hidrológico assume um papel crucial ao permitir a análise e estimativa de previsão dos eventos hidrológicos que têm impacto direto na estabilidade e no funcionamento adequado dessas estruturas.

Segundo Pinto (1976), a hidrologia é concebida como a ciência que estuda a água na natureza, situando-se como parte integrante da Geografia Física e abrange, em especial, propriedades, fenômenos e distribuição da água na atmosfera, na superfície da Terra e no subsolo. Já Naghetinni & Pinto (2007) propõem uma definição mais abrangente, trazendo hidrologia como a ciência que investiga os fenômenos que determinam a distribuição espaço-temporal da água no planeta, considerando atributos de quantidade, qualidade e interação com as sociedades humanas. Essa abordagem ampla destaca a água não apenas como um componente natural, mas como um elemento integrador, cujas dinâmicas se entrelaçam diretamente com as atividades humanas e sociais.

Dessa forma, as diferentes nuances nas definições propostas evidenciam uma dualidade na compreensão da hidrologia: enquanto um enfoque destaca a água como um recurso natural, o outro a percebe como um elemento dinâmico que transcende as fronteiras naturais, dialogando intrinsecamente com as sociedades humanas. Essa dualidade enriquece a abordagem hidrológica,

incorporando tanto a sua dimensão ambiental quanto a sua relevância para o convívio humano e suas práticas.

No âmbito da segurança de barragens, essa disciplina desempenha um papel fundamental em várias etapas, incluindo o estudo de viabilidade hídrica, concepção do projeto do reservatório e seus dispositivos hidráulicos, sua operação contínua, até sua desativação. Para determinar o dimensionamento do reservatório, leva-se em consideração não apenas o volume a ser acumulado, mas também as características hidrológicas da região, como padrões de chuva, escoamento superficial e níveis de vazão dos rios.

Para se conceber a construção de barragens se faz necessário, dentre outros fatores já mencionados, o dimensionamento do projeto hidrológico que requer a utilização de cálculos estimativos que considerem a ocorrência de precipitações, sobretudo para os cálculos da intensidade da chuva e vazão de projeto (DAEE, 2005).

A revisão da vazão de projeto é respaldada por normativas e legislações que buscam alinhar as estruturas existentes com os padrões contemporâneos de segurança. A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) representa um marco legal que estabelece diretrizes e critérios para a segurança de barragens em território nacional. A legislação reconhece a importância da hidrologia ao demandar a revisão periódica e aprimoramento das vazões de projeto, considerando a necessidade de adaptação às mudanças ambientais e climáticas.

Assim, a hidrologia não apenas fornece as bases para o cálculo das vazões de projeto, mas também fundamenta a dinâmica de revisões necessárias para garantir a segurança contínua das barragens e das comunidades em seu entorno. O entendimento aprofundado das características hidrológicas regionais torna-se um elemento central na gestão preventiva e na mitigação de riscos associados às barragens, contribuindo para a preservação da vida e do meio ambiente.

2.3. Vazão de projeto

A vazão de projeto, no contexto de engenharia hidrológica, refere-se à quantidade de água que um determinado projeto estrutural, como uma barragem, uma estação de tratamento de água ou um canal, deve ser capaz de lidar em condições específicas. Para barragens, essa quantidade é geralmente calculada com base em análises hidrológicas milenares ou até mesmo decamilenares, que consideram diversos fatores como precipitação, características do terreno, tamanho da bacia hidrográfica e outros elementos relevantes.

Considerando que uma barragem é construída no leito de um rio e que a vazão deste depende, também, da intensidade e duração das precipitações, além das características físicas da bacia hidrográfica na qual está inserido, procura-se estabelecer para fins de projeto um valor de vazão que tenha pouca probabilidade de ser igualada ou superada pelo menos uma vez dentro da vida útil da obra (BERTONI; TUCCI, 2004).

Segundo DAEE (2005) a cheia de projeto está associada a um Período de Retorno (T_r) que é o tempo médio em anos que o evento é igualado ou superado pelo menos uma vez. Franco (2008) alerta que é na adoção de T_r que muitas vezes reside o equívoco de um projeto, uma vez que o mesmo representa o risco a ser assumido no dimensionamento de uma obra hidráulica. Ou seja, vincula ao empreendimento o grau de segurança que se deseja proporcionar.

A decisão sobre superestimar ou não o projeto da barragem se configura como um equilíbrio delicado entre as demandas do empreendedor, que busca minimizar os custos, e as exigências das entidades de regulamentação e fiscalização por segurança. Essa dinâmica pode ser comparada a uma balança, onde de um lado está o custo financeiro investido na construção, procurando ser o mínimo aceitável para

o empreendedor, e do outro lado encontra-se a necessidade de garantir que a barragem seja capaz de lidar com eventos de vazões extremamente raras, garantindo a segurança pública. Assim, o desafio reside em encontrar um ponto de equilíbrio, onde a segurança da barragem seja garantida sem que o custo se torne exorbitantemente alto, mas ainda assim atenda aos requisitos de segurança.

3. METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho consiste em descrever as etapas de produção das análises hidrológicas que envolvem a elaboração e revisão de um hidrograma de projeto. Para tanto, foram definidas nove etapas (Figura 1 – Fluxograma das etapas): (I) Localização e caracterização da barragem e da rede de drenagem; (II) Obtenção dos dados hidrológicos; (III) Escolha da estação pluviométrica para atualizar os estudos hidrológicos da Barragem; (IV) Definição da metodologia utilizada para a elaboração da curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF); (V) Construção do hietograma de projeto; (VI) Transformação do hietograma de projeto em hietograma excedente; (VII) Elaboração do hidrograma unitário; (VIII) Transformação do hidrograma unitário em hidrograma de projeto e (IX) Análise do hidrograma e constatação da segurança da barragem.

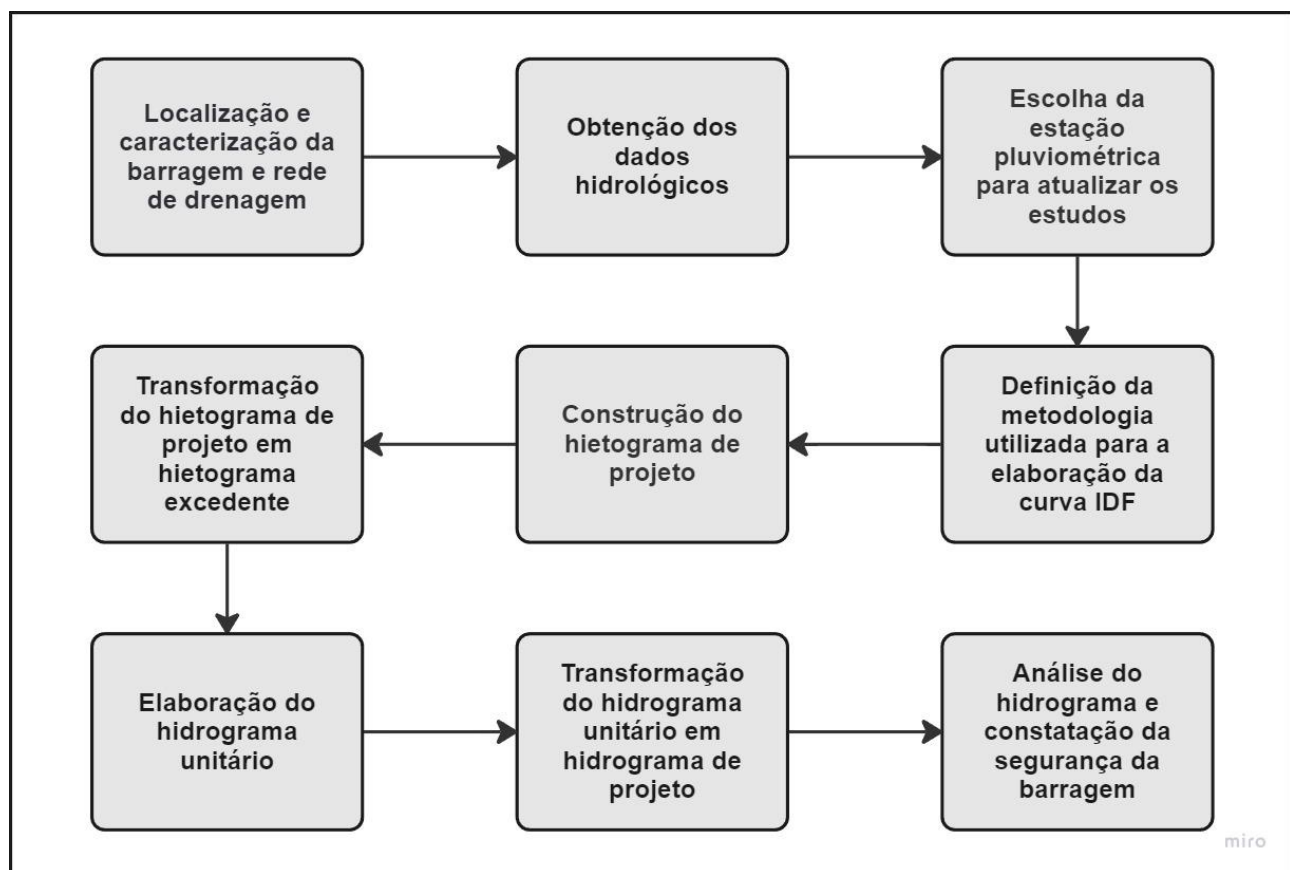


Figura 1: Fluxograma das etapas. **Fonte:** Elaboração própria.

3.1. Localização e caracterização da barragem e da rede de drenagem

A etapa inicial compreende à localização e caracterização da barragem e da rede de drenagem em que a barragem está inserida. Para estudo de caso foi selecionada a barragem Apertado, no município de Mucugê, no Estado da Bahia. Essa decisão foi norteada pelo acesso facilitado à informação, pela disponibilidade de dados e relevância desse barramento para a população local uma vez que envolve o atendimento de múltiplos usos da água. A barragem se localiza nas porções iniciais da Bacia Hidrográfica do Rio Paraguaçu, uma região marcada por conflitos pelo uso da água em virtude da grande demanda por irrigação. Dessa forma, a barragem Apertado tem uma grande importância para a região ao favorecer o abastecimento público e a irrigação.

A utilização de ferramentas de geoprocessamento em Sistemas de Informações Geográficas é necessária para a análise espacial e mapeamento de bacias hidrográficas, características do terreno e uso do solo na região. Espera-se como resultado as informações sobre a área da bacia hidrográfica, a declividade e a extensão do talvegue até a barragem, a localização da barragem, a localização das estações pluviométricas e fluviométricas, e do tipo de barragem e suas estruturas.

3.2. Obtenção dos dados hidrológicos

A etapa sequencial é referente à obtenção dos dados hidrológicos. Para isso, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) hospeda no Portal HidroWEB os registros das estações pluviométricas e fluviométricas de todo território nacional. Vale lembrar que as vazões e os hidrogramas de projeto são determinados através da análise direta dos dados observados de vazões ou pela análise indireta de certas características físicas da bacia hidrográfica e dados observados de chuva. A existência de séries históricas de chuva são geralmente mais frequentes do que as de vazão e, em virtude disso, optou-se por realizar a análise indireta para a atualização dos estudos hidrológicos da barragem Apertado.

Dessa forma, os dados pluviométricos foram obtidos através do domínio virtual HIDROWEB (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>) utilizando do recurso “Séries Históricas” para identificação e compilação dos dados apropriados para a análise. Foi aplicado um filtro para localizar todas as estações pluviométricas no município de Mucugê, local onde está localizada a barragem Apertado. O download dos dados foi efetuado em formato .MDB e importado em um banco de dados no *software* HIDRO, versão 1.4. Neste ambiente, as informações sobre pluviosidade média e máxima foram organizadas e importadas no *software* EXCEL 2019.

3.3. Escolha da estação pluviométrica para atualizar os estudos hidrológicos da Barragem

A terceira etapa resume-se a escolher qual estação será utilizada. A escolha é norteada pela posição da estação em relação à barragem, pela quantidade de anos monitorados e pela pluviosidade média entre as estações. Para esta última, serão comparadas todas as estações disponíveis através da aplicação de uma metodologia de estudo estatístico do comportamento da chuva com tempos de retorno até a decaimilênar. Dessa forma, é possível perceber um padrão de precipitação na região e escolher a estação mais apropriada.

3.4. Definição da metodologia utilizada para a elaboração da curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF)

A quarta etapa refere-se à escolha das metodologias mais apropriada para a construção da curva IDF. Será necessário aplicar uma metodologia de probabilidade para estimar a chuva máxima de dez mil anos de tempo de retorno para a estação selecionada. Segundo Sansigolo (2008), as distribuições que melhor se ajustam à precipitação máxima diária são as de Gumbel Weibull, Normal e Gumbel. Dessa forma, aplicou-se o método de probabilidade de Gumbel na série de dados da estação selecionada para a atualização dos estudos hidrológicos da barragem Apertado.

Após, foi utilizado o método proposto por Campos-Aranda (1978) para realizar uma desagregação temporal da chuva. Esse procedimento é necessário pois possibilita distribuir um dado de chuva diário (24h) em durações de precipitação menores que um dia. Para a transformação destes dados em hietograma ainda é necessário a determinação da curva IDF. Para isso, utilizou-se a equação IDF tipo Sherman que possui o formato abaixo:

$$i = \frac{K \cdot TR^m}{(b + t)^n} \quad (1)$$

Em que: i = intensidade em mm/h; TR = tempo de retorno em anos; t = duração em minutos; K , m , b , n são parâmetros adimensionais obtidos através de ajustes.

Como a equação da curva IDF é uma equação exponencial, podem-se aplicar as propriedades que relacionam as equações potenciais com as logarítmicas. Para isso, foi chamado o denominador da equação de uma variável C , tendo-se assim a seguinte equação (2):

$$i = \frac{C}{(b + t)^n} \quad (2)$$

Onde $C = K \cdot TR^m$

Aplicando-se as propriedades matemáticas na equação (1), temos,

$$\log(i) = \log(C) - n \log(t + b) \quad (3)$$

$$\log(C) = \log(K) + m \log(T) \quad (4)$$

Pode-se observar que a expressão (3) é uma reta linear ($Y=Ax+B$) onde não são conhecidos os coeficientes n e $\log C$, fazendo uma analogia a equação da reta, em que $A = n$ e $B = \log C$. O parâmetro b é encontrado pelo método de tentativa e erro, sendo este valor o que mais lineariza a reta. Uma regressão linear foi aplicada encontrando-se assim estes valores de $\log C$ e n .

Sabendo o valor do $\log C$, é possível aplicar este parâmetro na equação (4) e através da regressão linear obter os valores de m e $\log(K)$. Desta forma, encontraram-se os valores de m e K , finalizando a determinação de todos os parâmetros necessários. Como esses parâmetros foram calculados no Excel, o método de encontrar o parâmetro b foi por tentativa e erro, porém, o mesmo não foi feito manualmente, foi utilizado o comando Solver no Excel, alterando os valores automaticamente. Todos os parâmetros estão em função de b e ao final do processo aplica-se o solver para encontrar o valor de b , que melhor aproxima os valores. Desta forma, é possível construir a curva IDF da região a partir da estação escolhida.

Alternativamente, é possível consultar o mapa de chuvas intensas para o Brasil desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da Universidade Federal de Viçosa. Esse recurso está disponível por meio do software PLUVIO, oferecendo uma ferramenta valiosa para compreender e monitorar padrões de precipitação intensa em todo o país. Nele, há um banco de dados exibindo a curva IDF de cada município. Para este estudo, foi consultado a IDF do município de Mucugê e contrastado com a IDF calculada a partir dos dados de chuva obtidos da estação selecionada.

Por fim, é interessante também consultar estudos acadêmicos que possam oferecer informações atualizadas ou mais adaptadas à região de estudo da barragem. No caso da Barragem Apertado, não foi identificado trabalhos acadêmicos com curva IDF para o município de Mucugê.

3.5 Construção do hietograma de projeto

A quinta etapa resume-se à transformação da informação obtida pela curva IDF em gráfico de chuva. Este é conhecido como hietograma sendo construído através da determinação do tempo de retorno e duração da chuva após determinado os parâmetros da curva IDF. Para o estudo, foi aplicado as durações de 5 a 60 minutos e tempo de retorno de 2 a 10.000 anos. Após, a intensidade de precipitação foi multiplicada por um tempo de duração equivalente ou maior ao tempo concentração da bacia e então aplicado o método dos blocos alternados na intenção de organizar a informação de forma que represente o comportamento característico de uma chuva e transformá-lo no hietograma de projeto.

3.6. Transformação do hietograma de projeto em hietograma excedente

Na sequência, o hietograma de projeto será utilizado como informação de entrada para a elaboração do hietograma excedente. Essa manobra tem como objetivo quantificar qual parcela da chuva efetivamente contribui para o escoamento superficial da bacia. Para fazer isso, é necessário calcular o tempo de concentração da bacia.

Segundo Silveira (2005), o tempo de concentração é um parâmetro hidrológico que surge da hipótese que a bacia hidrográfica responde como sistema linear para o escoamento superficial direto. Decorre desta hipótese a definição de tempo de concentração como o tempo necessário para que toda a bacia esteja contribuindo na seção de saída.

Tabela 1: relação de metodologias para cálculo do tempo de concentração

Nome	Equação
Izzard	$T_c = 85,5 (i/36286 + C_r) i^{-0,667} L^{0,33} S^{-0,333}$
Kerby-Hathaway	$T_c = 0,619 N^{0,47} L^{0,47} S^{-0,235}$
Onda Cinem.	$T_c = 7,35 n^{0,6} i^{-0,4} L^{0,6} S^{-0,3}$
FAA	$T_c = 0,37 (1, 1-C) L^{0,5} S^{-0,333}$
Kirpich	$T_c = 0,0663 L^{0,77} S^{-0,385}$
SCS Lag	$T_c = 0,057 (1000/CN - 9)^{0,7} L^{0,8} S^{-0,5}$
Ven te Chow	$T_c = 0,160 L^{0,64} S^{-0,32}$
Simas-Hawkins	$T_c = 0,322 A^{0,594} L^{-0,594} S^{-0,150} S_{SCS}^{0,313}$
Dooge	$T_c = 0,365 A^{0,41} S^{-0,17}$
Corps Engineers	$T_c = 0,191 L^{0,76} S^{-0,19}$
Giandotti	$T_c = 0,0559 (4A^{0,5} + 1,5L) L^{-0,5} S^{-0,5}$
Pasini	$T_c = 0,107 A^{0,333} L^{0,333} S^{-0,5}$
Ventura	$T_c = 0,127 A^{0,5} S^{-0,5}$
Picking (11)	$T_c = 0,0883 L^{0,667} S^{-0,333}$
DNOS (12)	$T_c = 0,419 K^{-1} A^{0,3} L^{0,2} S^{-0,4}$

Fonte: Silveira (2005)

A partir da escolha de uma entre diversas metodologias, foi calculado o tempo de concentração da bacia e o *curve number* (CN) para estimar a precipitação efetiva. Para esta estimativa foi adotado o método *Soil Conservation Service* - SCS, que é representado pela seguinte equação:

$$P_{ef} = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S)}, \text{ Para } P > 0,2 S \quad (6)$$

Onde P_{ef} é a precipitação que efetivamente contribui para o escoamento, P é a precipitação em mm, e S é uma variável calculada através da equação 7:

$$S(mm) = 25,4 \times (1.000/CN - 10) \quad (7)$$

Este método oferece a capacidade de estimar um valor inicial de infiltração, que hipoteticamente serve como uma representação da condição de saturação do solo. Essa estimativa determina o ponto em que a capacidade de infiltração é nula e portanto, a precipitação é convertida efetivamente em escoamento superficial. Estes dados quando exibidos em forma de gráfico são conhecidos como hietograma excedente.

3.7. Elaboração do hidrograma unitário

Conceitualmente, o Hidrograma Unitário é o hidrograma do escoamento direto, causado por uma chuva efetiva unitária de 1 milímetro ou de 1 centímetro, por isso, o método é chamado de hidrograma unitário (Collischonn, 2015). Para o modelo SCS utiliza-se o hidrograma unitário sintético triangular, definido pela vazão de pico, pelo tempo de pico e pelo tempo de base, conforme exhibe a Figura 2.

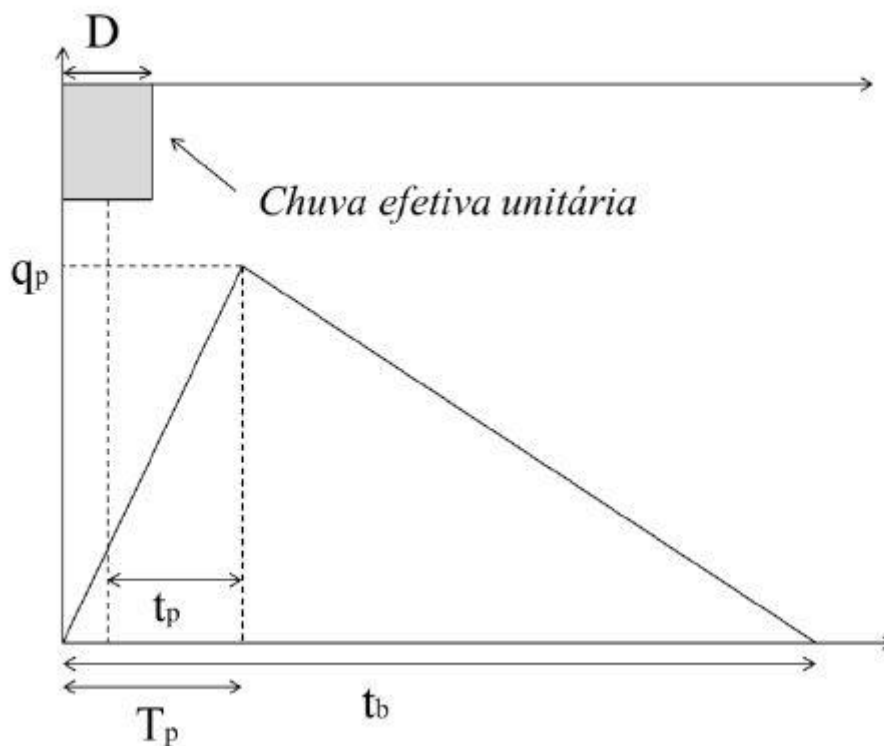


Figura 2: Hidrograma Unitário Triangular SCS. **Fonte:** Adaptado de Collischonn, (2015)

Os cálculos da vazão de pico, do tempo de pico e do tempo de base requerem a aplicação das seguintes equações:

Tabela 2: Equações utilizadas para elaboração do hidrograma unitário

Nome	Equação
Duração da precipitação excedente	$t_r = 0,17 \times t_c$
Tempo de Resposta da Bacia	$t_L = 0.6 \times t_c$
Tempo de ocorrência de pico	$t_p = 0.5 \times t_r + t_L$
Tempo de Base	$t_b = 2.67 \times t_p$
Vazão de pico (Vazão máxima)	$Q_{u,p} = \frac{2,08 \times A_d}{t_p}$

Fonte: Elaboração própria com base nas informações apresentadas por Chow et. al. (1988).

Onde, t_c é o tempo de concentração da bacia e A_d é a área da bacia.

3.8. Transformação do hidrograma unitário em hidrograma de projeto

O hidrograma unitário serviu de base para a produção do hidrograma de projeto. Essa transformação ocorre com a introdução do hietograma excedente. A partir da análise do hidrograma unitário será possível identificar a quantidade de blocos de chuva e sua vazão unitária que, ao multiplicar pela chuva excedente resultará na vazão final de projeto. A disposição dessa informação em gráfico é conhecida como hidrograma de projeto.

Para auxiliar nesta etapa, foi utilizado o software Hydrologic Modeling System (HEC-HMS), desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA, para simular a resposta da bacia de drenagem da Barragem Apertado à chuva de projeto, gerando, assim, o hidrograma de projeto.

3.9. Análise do hidrograma e constatação da segurança da barragem

A última etapa é referente à análise do comportamento do hidrograma de projeto gerado. Neste momento será possível identificar o seu valor de vazão de pico e então comparar com a vazão de projeto utilizada para dimensionar a barragem Apertado. Esse evento compromete não apenas a integridade física da estrutura, mas também sua capacidade de retenção, gerando riscos iminentes à segurança da barragem e das áreas abaixo dela. Por outro lado, se a vazão de pico estiver dentro dos limites previstos, a barragem é considerada apta para suportar a vazão máxima de referência adotada, garantindo sua estabilidade e funcionalidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, os resultados e discussões são apresentados com base na sequência metodológica anteriormente delineada. A escolha das metodologias foi cuidadosamente realizada, considerando diversas opções na literatura científica. Esta abordagem visa assegurar a confiabilidade dos resultados e proporcionar uma análise interpretativa abrangente dos dados.

4.1. Localização e informações sobre a barragem Apertado-BA

Segundo a Secretaria de Infraestrutura Hídrica e Saneamento da Bahia (2018), as informações e características da barragem Apertado são exibidas na Figura 3 a seguir.



Figura 3: Informações sobre a barragem Apertado. Fonte: Secretaria de Infraestrutura Hídrica e Saneamento, 2018.

A barragem Apertado está localizada no rio Paraguaçu, um rio de domínio estadual, não tendo como objetivo principal a geração de energia, mas sim o atendimento a múltiplos usos, como abastecimento de água, controle de cheias e irrigação. Sendo assim, a responsabilidade pelo monitoramento e fiscalização da barragem recai sobre o órgão gestor do estado, o Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (INEMA), considerando que a barragem está localizada no estado da Bahia.

No contexto do monitoramento atual da barragem, os dados operacionais são regularmente atualizados e apresentados no relatório diário de monitoramento emitido pela Companhia de Engenharia Hídrica e Saneamento da Bahia (CERB). Este relatório inclui informações detalhadas sobre o estado operacional da barragem Apertado, tais como níveis de água, vazão de saída e condições estruturais, fornecendo uma visão abrangente do funcionamento da barragem. Tais dados são apresentados na Figura 4 e na Tabela 3, sendo essenciais para garantir a segurança e o bom desempenho da barragem.

A Tabela 3 apresenta o registro detalhado do comportamento do reservatório da barragem Apertado ao longo de um período específico. Os dados incluem a data de cada registro, a cota do reservatório em metros, o volume observado em metros cúbicos, o percentual de volume do reservatório, a vazão defluente em metros cúbicos por segundo e a precipitação registrada em milímetros. A partir desses dados, é possível monitorar variações na cota do reservatório, avaliar a eficácia das operações de liberação de água (vazão defluente) e identificar padrões de precipitação que possam influenciar o comportamento hidrológico do reservatório. Essas informações são cruciais para garantir a segurança e o bom desempenho da barragem, auxiliando os responsáveis pelo seu monitoramento na tomada de decisões e na implementação de medidas preventivas, quando necessário.

RELATÓRIO DIÁRIO DE MONITORAMENTO DOS RESERVATÓRIOS DAS BARRAGENS OPERADAS PELA CERB

BACIA: PARAGUAÇU
BARRAGEM: APERTADO
MUNICÍPIO: MUCUGÊ

Cota Vol. Mínimo:
Área Vol. Morto:
VOLUME MÁX. NORMAL: 108,69 hm³
COTA N. A. MÁX. NORMAL: 1.017 m

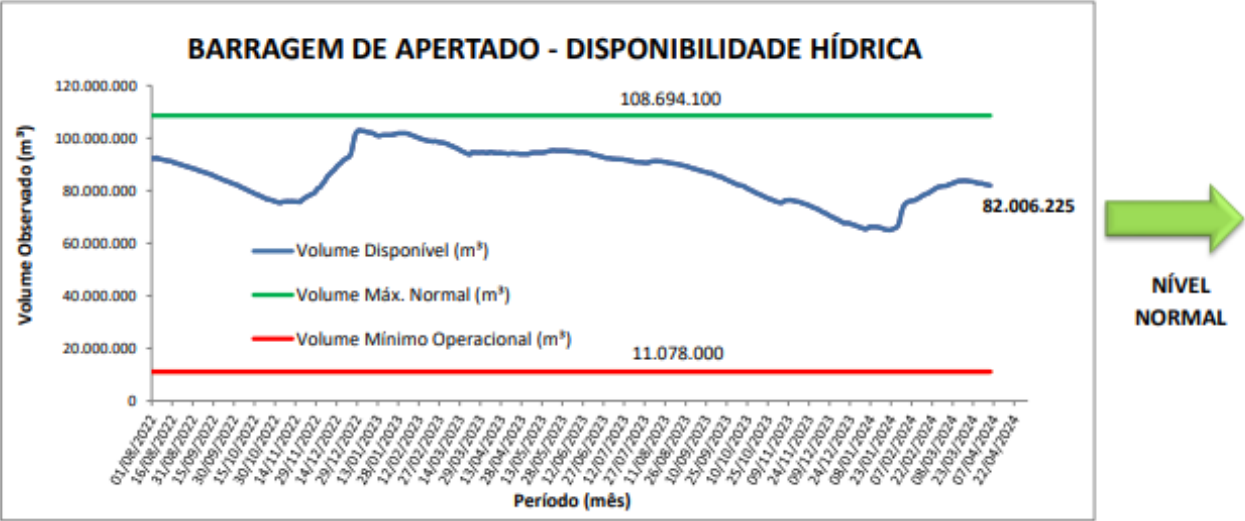


Figura 4: Relatório diário de monitoramento do reservatório da barragem Apertado. Fonte: CERB, 2024

Tabela 3: Registro do comportamento do reservatório da barragem Apertado

Data	Cota (m)	Vol. Observado (m³)	Vol. (%)	Vazão defluente (m³/s)	Precipitação. (mm)
22/03/2024	1015,00	83.473.600	76,80%	0,400	0,0
23/03/2024	1014,99	83.360.725	76,69%	0,400	0,0
24/03/2024	1014,98	83.247.850	76,59%	0,400	0,0
25/03/2024	1014,96	83.022.100	76,38%	0,400	0,0
26/03/2024	1014,95	82.909.225	76,28%	0,400	0,0
27/03/2024	1014,94	82.796.350	76,17%	0,400	0,0
28/03/2024	1014,94	82.796.350	76,17%	0,400	0,0
29/03/2024	1014,94	82.796.350	76,17%	1,000	1,5
30/03/2024	1014,93	82.683.475	76,07%	1,000	0,0
31/03/2024	1014,91	82.457.725	75,86%	1,000	0,0
01/04/2024	1014,90	82.344.850	75,76%	1,000	0,0
02/04/2024	1014,89	82.231.975	75,65%	1,000	0,0
03/04/2024	1014,88	82.119.100	75,55%	1,000	8,0
04/04/2024	1014,87	82.006.225	75,45%	1,000	0,0
05/04/2024	1014,87	82.006.225	75,45%	1,000	0,0

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados divulgados pela CERB, 2024

A partir das coordenadas exibidas na Figura 3, torna-se relevante a criação de uma representação visual para a localização do eixo do barramento e da área da rede de drenagem, facilitando assim sua posterior análise. Para essa finalidade, optou-se pela utilização do software Google Earth PRO devido à sua praticidade e ampla acessibilidade. Utilizando esse software, foi possível demarcar o ponto que representa o eixo da barragem. A Figura 5 ilustra o eixo georreferenciado da barragem Apertado, fornecendo uma visualização de sua localização geográfica.



Figura 5: Localização da barragem Apertado, em Mucugê no estado da Bahia. **Fonte:** Elaboração própria a partir do software Google Earth e das informações obtidas da Secretaria de Infraestrutura Hídrica (2018).

Essa abordagem permite uma análise mais detalhada e eficiente da área em análise, facilitando o planejamento e a execução de estudos hidrológicos e ambientais relacionados à barragem. Este ponto foi exportado em formato KMZ e inserido em um sistema de informações geográficas. Neste estudo, este ponto foi incorporado ao SIG Qgis, versão 3.28.12, e sobreposto a uma camada referente à delimitação da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu, conforme exibe a Figura 6.

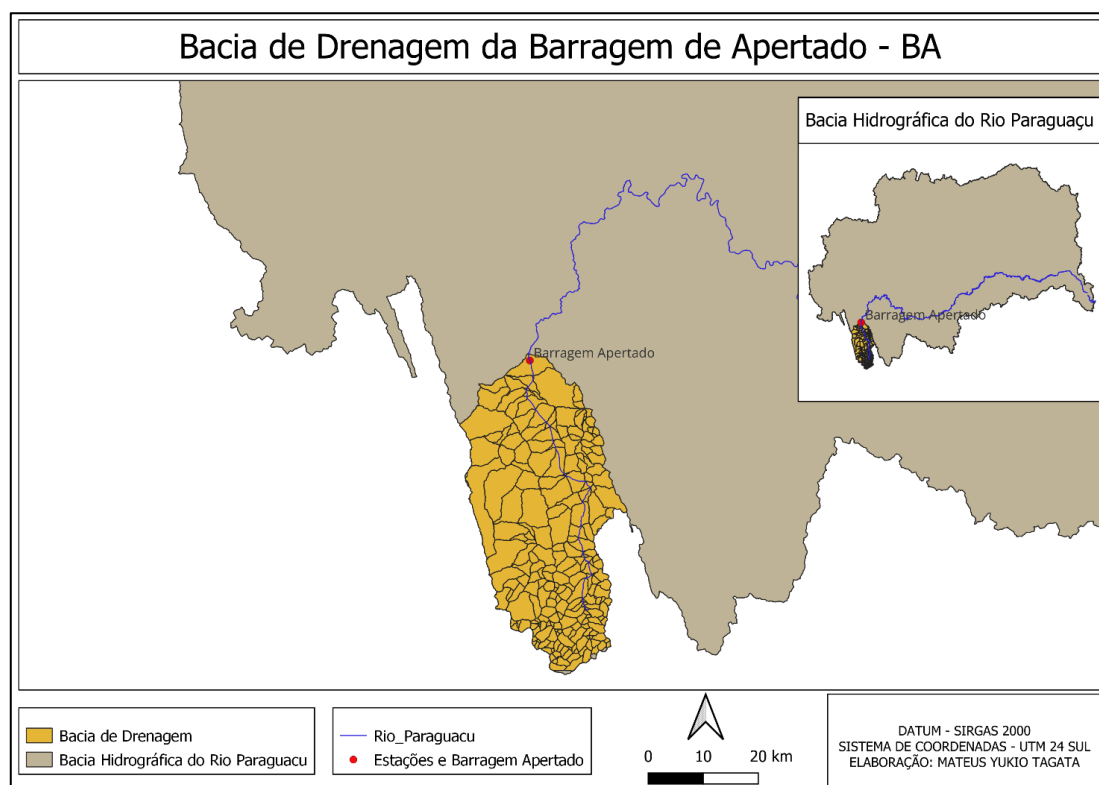


Figura 6: Limites da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu e localização da barragem Apertado. **Fonte:** Elaboração própria a partir do software Qgis e das informações obtidas da Secretaria de Infraestrutura Hídrica (2018).

A figura acima exibe as sub-bacias de contribuição até a barragem. Na ausência dessa informação é possível determinar a rede de drenagem através da criação de um polígono único para a região à montante do barramento, conforme ilustra a Figura 7.

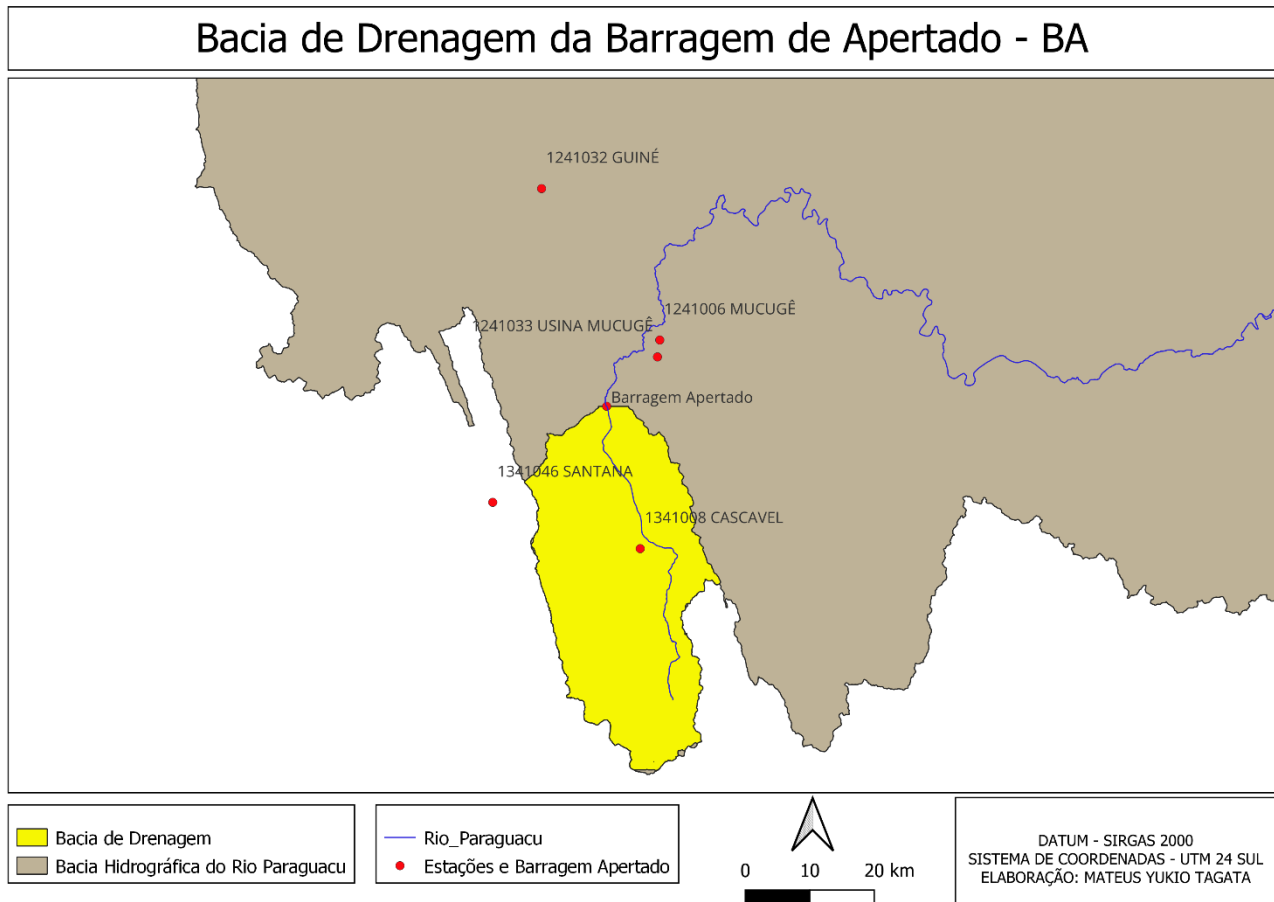


Figura 7: Rede de drenagem da barragem Apertado. **Fonte:** Elaboração própria a partir do software Qgis e das informações obtidas da Secretaria de Infraestrutura Hídrica (2018).

Com o auxílio da ferramenta “calculadora de campo” do próprio Qgis, foi determinado uma área de aproximadamente 1132,20 km². Outras informações podem ser extraídas desse produto. Ao medir o comprimento do rio Paraguacu neste trecho, foi identificado o valor aproximado de 56,216 km. É possível também identificar a elevação média por uma aproximação no Google Earth Pro. Ao identificar o ponto de nascente e criar um caminho até a barragem que simule o talvegue do rio, é possível obter a informação relativa à declividade utilizando a função “mostrar perfil de elevação”, conforme exibe a Figura 8.

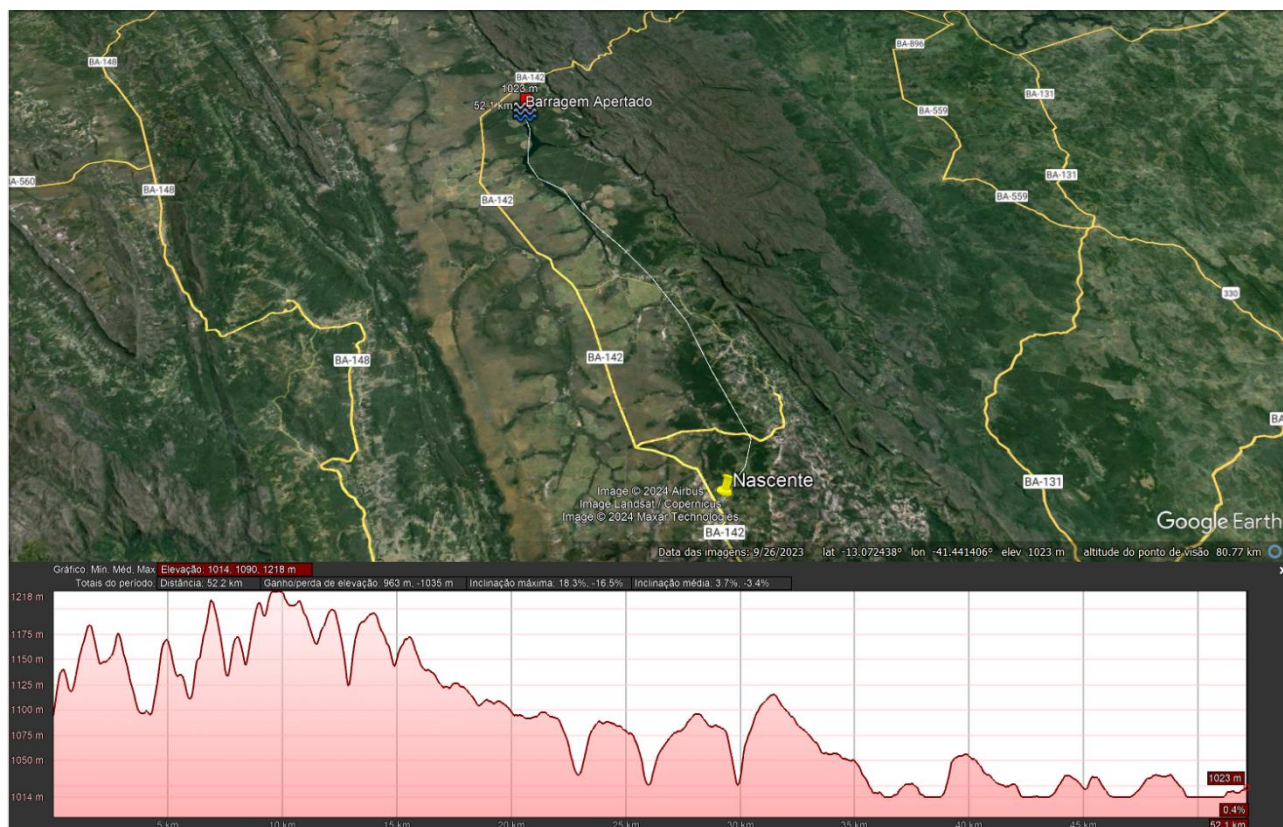


Figura 8: Perfil de elevação para a bacia de drenagem da barragem Apertado. **Fonte:** Elaboração própria a partir do software Google Earth e das informações obtidas da Secretaria de Infraestrutura Hídrica (2018).

A Tabela 4 exibe uma série de informações relacionadas à barragem Apertado. Esses dados abrangem diversos aspectos, como informações gerais da barragem, os níveis de água registrados, o comportamento da vazão de saída e características construtivas. Essas informações são fundamentais para compreender o funcionamento hidrológico da barragem, bem como para avaliar sua capacidade de resposta às condições ambientais e climáticas. Além disso, permitem uma análise mais aprofundada sobre a eficácia das medidas de gestão e monitoramento atualmente implementadas. Essa compreensão detalhada do comportamento da barragem é essencial para garantir sua segurança e eficiência operacional a longo prazo.

Tabela 4: Informações obtidas sobre a barragem Apertado.

CARACTERÍSTICAS GERAIS	
Nome da Barragem:	Barragem Apertado
Município:	Mucugê
Localização:	Fazenda Horacinópolis
Estado:	Bahia
Rio Barrado:	Rio Paraguaçu
Bacia Hidrográfica:	Rio Paraguaçu
Uso Principal:	Abastecimento humano e irrigação
Ano de Construção:	1998
Outorga de Construção:	Processo N° 014/1997
Empreendedor:	CERB
Órgão Fiscalizador:	INEMA-BA

▪ Coordenadas:	▪ Latitude: 13°04'39.5" S ▪ Longitude: 41°26'31.4" O
▪ Categoria de Risco:	▪ Médio
▪ Dano Potencial Associado:	▪ Alto
▪ Nível de Perigo:	▪ Alerta
▪ Classe:	▪ A
▪ Código SNISB:	▪ 553
○ CARACTERÍSTICAS DO MACIÇO	
▪ Tipo:	▪ Terra Homogênea
▪ Cota do Coroamento:	▪ 1.023,70 m
▪ Extensão pelo Coroamento:	▪ 701,8 m
▪ Largura do Coroamento:	▪ 8,6 m
▪ Altura Máxima:	▪ 27,2 m
○ RESERVATÓRIO	
▪ Área da Bacia Hidrográfica:	▪ 1.132,20 km ²
▪ Volume Total:	▪ 98.233.000 m ³
▪ Volume Útil:	▪ 87.300.250 m ³
▪ Volume Morto:	▪ 10.932.750 m ³
▪ N.A. Mínimo Operacional:	▪ 1.005,95 m
▪ N.A. Máximo Normal:	▪ 1.017,00 m
▪ N.A. Máximo <i>Maximorum</i> (TR = 1000 anos):	▪ 1.022,08 m
▪ Vazão Afluentes (TR = 1.000 anos):	▪ 1.810,61 m ³ /s
▪ Vazão Afluentes (TR = 10.000 anos):	▪ 2.582,00 m ³ /s
▪ Desnível do Talvegue	▪ 219 m
▪ Comprimento talvegue	▪ 56,216 km
○ EXTRAVASOR	
▪ Tipo:	▪ Em concreto, com soleira livre - Perfil Creager
▪ Localização:	▪ Ombreira esquerda
▪ Largura:	▪ 50,00 m
▪ Vazão de Projeto (TR = 1000 anos):	▪ 878 m ³ /s
▪ Cota da Soleira:	▪ 1.017,00 m

Fonte: Elaboração própria a partir das informações obtidas da Secretaria de Infraestrutura Hídrica (2018), do SNISB (2024), da CERB (2024) e de documentos compartilhados com o autor.

A partir dos documentos compartilhados com o autor, foi possível conhecer a relação Cota x Área x Volume do reservatório da barragem Apertado e que esta foi elaborada a partir da integração de aerolevantamento (para obtenção dos dados topográficos na parte seca do reservatório) e com levantamento topobatimétrico convencional com barco (para obtenção dos dados topográficos na parte submersa do reservatório). O resultado é demonstrado a seguir, na Tabela 5.

Tabela 5: Relação Cota x Área x Volume do reservatório da barragem Apertado

Cotas (m)	Área (km²)	Volume (hm³)
996,00	0,000	0,000
997,00	0,000	0,000
998,00	0,002	0,001
999,00	0,010	0,006
1000,00	0,069	0,034
1001,00	0,641	0,341
1002,00	1,441	1,376
1003,00	2,097	3,179
1004,00	2,529	5,493
1005,00	2,840	8,192
1006,00	2,899	11,077
1007,00	2,901	13,977
1008,00	5,387	18,121
1009,00	6,256	23,942
1010,00	7,114	30,628
1011,00	8,155	38,263
1012,00	8,535	46,607
1013,00	9,414	55,582
1014,00	9,870	65,224
1015,00	10,224	75,271
1016,00	11,650	86,208
1017,00	12,400	98,233
1018,00	13,001	110,933
1019,00	14,341	124,604
1020,00	16,341	139,945
1021,00	17,393	156,812
1022,00	18,236	174,627
1023,00	18,889	193,189
1024,00	20,836	213,051
1025,00	23,742	235,340

Fonte: Elaboração própria a partir das informações obtidas da Secretaria de Infraestrutura Hídrica (2018), do SNISB (2024), da CERB (2024) e de documentos compartilhados com o autor.

4.2. Dados pluviométricos disponíveis

No dia 21 de março de 2024, foi realizada a aquisição dos dados de todas as estações pluviométricas situadas no município de Mucugê. A Tabela 6 resume os resultados dessa seleção. Esses dados são fundamentais para a análise do regime de chuvas na área de estudo e contribuem significativamente para o entendimento dos padrões climáticos locais.

Tabela 6: Estações pluviométricas existentes em Mucugê-BA.

Código	Nome	Estado	Município	Lat	Long	Anos de dados	Anos
1241006	MUCUGÊ	BAHIA	MUCUGÊ	-12:59:00	-041:22:00	11/1963 - 01/1995	30
1241013	GUINÉ	BAHIA	MUCUGÊ	-12:47:00	-041:31:00	11/1963 - 12/1984	14

1241032	GUINÉ	BAHIA	MUCUGÊ	-12:45:59	-041:32:10	05/1984 - 12/2006	40
1241033	USINA MUCUGÊ	BAHIA	MUCUGÊ	-13:00:27	-041:22:12	03/1985 - 12/2006	39
1241041	GUINÉ	BAHIA	MUCUGÊ	-12:46:12	-041:32:21	04/2000 - 03/2014	14
1341008	CASCADEL	BAHIA	MUCUGÊ	-13:16:56	-041:23:41	11/1963 - 11/1999	33
1341046	SANTANA	BAHIA	MUCUGÊ	-13:12:57	-041:36:22	06/2005 - 10/2023	19

Fonte: Elaboração própria a partir do banco de dados da ANA através do Portal HidroWeb.

Destas, as estações GUINÉ (1241013) e GUINÉ (1241041) foram desconsideradas. Esta decisão foi norteada pela grande quantidade de falhas observadas nos registros de medição. Apesar de 14 anos de dados, muitas vezes esses registros consistem em apenas algumas informações por mês, o que resulta em um resumo anual que não reflete completamente o ano inteiro.

A seguir, na Tabela 7, são apresentados os resultados da análise de chuvas máximas diárias de cada estação. Percebe-se que as estações GUINÉ e CASCADEL apresentam médias próximas e uma boa quantidade de dados. Além disso, as estações estão localizadas próximas à barragem Apertado (Figura 9), o que é uma vantagem, pois proporciona uma maior fidelidade à realidade das condições na área da barragem.

Tabela 7: Resultados da análise da chuva máxima diária das estações.

Estação	MUCUGÊ	GUINÉ	USINA MUCUGÊ	CASCADEL	SANTANA
Código	1241006	1241032	1241033	1341008	1341046
Média	90,7	68,3	171,7	67,7	55,4
Desvio Padrão	15,94	31,76	153,97	22,36	21,04
Máximo	124,0	162,7	679,7	127,0	98,4
Mínimo	57,0	7,4	48,0	32,0	15,5
>100 mm	8	5	19	1	0
>150 mm	0	1	13	0	0
>200 mm	0	0	13	0	0
Nº Eventos	30	40	39	33	19

Fonte: Elaboração própria a partir do banco de dados da ANA através do Portal HidroWeb.



Figura 9: Localização das estações pluviométricas de Mucugê-BA. **Fonte:** Elaboração própria a partir do software Google Earth e das informações obtidas através do Portal HidroWeb da ANA.

4.3. Escolha da estação pluviométrica para atualizar a vazão de projeto

Das cinco estações remanescentes, foi escolhido a estação GUINÉ (1241032) para a atualização da vazão de projeto. Cabe a argumentação de que a estação CASCAVEL (1341008) é a mais adequada por sua localização e pelas vantagens que já foram mencionadas no capítulo anterior. No entanto, a série de dados da estação CASCAVEL termina no ano de 1999 e desta forma, não considera as alterações climáticas e toda a problemática abordada na introdução deste trabalho. Desta forma, a estação GUINÉ com dados até 2023 foi selecionada. Inclusive, cabe salientar que em fevereiro de 2022 a estação GUINÉ registrou um volume de precipitação (133,2 mm) que superou a máxima chuva histórica monitorada pela estação CASCAVEL (127 mm), o que corrobora para a decisão e sugere que de fato o regime de chuvas na região está sendo impactado pelas mudanças climáticas.

Sempre que possível, a determinação da estação deve considerar uma análise conjunta. Uma maneira de identificar estações que não deveriam ser consideradas é a análise estatística considerando o comportamento dos dados de cada estação para longos tempos de retorno. No estudo de caso foi aplicado o método de probabilidade Gumbel, que será melhor explanado no capítulo seguinte, e como resultado ficou evidenciado que todas, exceto a estação USINA MUCUGÊ (1241033), poderiam ser consideradas para a análise.

Tabela 8: Resultado da análise estatística para chuvas (mm) com tempo de retorno variado.

Código	Estação	TR=5	TR=10	TR=20	TR=25	TR=50	TR=100	TR=500	TR=1.000	TR=10.000
1241006	MUCUGÊ	102,2	111,5	120,4	123,3	132,0	140,7	160,7	169,4	198,0
1241032	GUINÉ	91,1	109,7	127,5	133,2	150,6	167,9	207,8	225,0	282,0
1241033	USINA MUCUGÊ	282,3	372,4	458,8	486,2	570,7	654,5	848,2	931,4	1.207,9
1341008	CASCAVEL	83,7	96,8	109,4	113,3	125,6	137,8	165,9	178,0	218,2
1341046	SANTANA	70,5	82,8	94,6	98,4	109,9	121,3	147,8	159,2	197,0

Fonte: Elaboração própria a partir do banco de dados da ANA através do Portal HidroWeb.

4.4. Elaboração da Curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF)

Para o dimensionamento de grandes estruturas, é orientado a utilização de eventos extremos de chuva, ou seja, precipitações com elevado tempo de retorno. Este, deverá ser adotado conforme recomendado pela obra Volume V- Diretrizes para a Elaboração de Projetos de Barragens, que faz parte do "Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens" da Agência Nacional de Águas – ANA, que prevê os seguintes critérios.

Tabela 9: Tempos de retorno mínimos (anos) recomendados para as cheias de projeto

Altura, h (m)	Volume, V (hm ³)	Tempo de Retorno (anos)
$h \geq 30$	$V \geq 50$	CMP ¹
$15 \leq h < 30$	$3 \leq V < 50$	1.000
$h < 15$	$V < 3$	500

Fonte: Diretrizes para a Elaboração de Projetos de Barragens, 2016. ANA. Nota: ¹ CMP – Cheia Máxima Provável.

Conforme exibido na Tabela 4 a barragem Apertado tem altura de 27 metros e volume de 98,233 hm³. Desta forma, a mesma deve estar segura para a cheia de tempo de retorno de 10.000 anos, considerando as recomendações acima.

No entanto, dez mil anos de dados registrados empiricamente não são uma realidade, exigindo que os hidrólogos utilizem artifícios de previsão do volume precipitado para uma chuva que seria igualada ou superada uma vez a cada dez mil anos. Para isso, podem ser utilizadas distribuições de probabilidade para se prever eventos que venham a ocorrer em períodos de recorrência que não se possui dados observados.

Geralmente as distribuições de valores de grandezas hidrológicas, tais como chuva, ajustam-se satisfatoriamente a distribuição tipo I de Fisher- Tippett, conhecida também como distribuição de Gumbel (VILLELA & MATTOS, 1975). Dessa forma, aplicou-se o método de probabilidade de Gumbel na série de dados da estação GUINÉ (1241032) e obteve-se o seguinte resultado:

Tabela 10: Resultados da estimativa da precipitação por tempo de retorno na estação GUINÉ (1241032)

TR (anos)	Precipitação (mm)
2	63,07
5	91,14
10	109,72
25	133,20
50	150,61
100	167,90
1000	225,03
10000	282,05

Fonte: Elaboração própria a partir do banco de dados da ANA através do Portal HidroWeb.

No entanto, estes são os valores acumulados totais da precipitação. Para a construção do hietograma de projeto é necessário descrever o fenômeno ao longo do tempo. Segundo Campos-Aranda (1978),

após vários estudos visando avaliar o comportamento de precipitações, verificou que, durante o período de um dia (24 horas) a quantidade precipitada varia em função do tempo de ocorrência, sendo que esta é mais intensa em seus momentos iniciais. Dessa forma, a desagregação representa a porcentagem de chuva precipitada à cada momento do evento, conforme ilustra a Tabela 11. Os coeficientes desagregados, constantes na tabela são bases para o cálculo da precipitação máxima com diferentes durações (h) e respectivos períodos de retorno.

Tabela 11: Desagregação temporal das chuvas calculadas no método de Gumbel

Coeficientes de desagregação de chuvas diárias										
Coeficiente de desagregação	0,30	0,39	0,46	0,52	0,57	0,61	0,68	0,80	0,91	1,00
Duração das precipitações (min)	60	120	180	240	300	360	480	720	1080	1440

Fonte: CAMPOS-ARANDA, 1978.

Ao aplicar as recomendações acima, temos os seguintes resultados para os dados da estação GUINÉ (1241032):

Tabela 12: Aplicação do coeficiente de desagregação da chuva nos dados da estação GUINÉ (1241032)

Período de retorno (Anos)									
Tempo (horas)	Coefic. Desagregação	2	5	10	25	50	100	1000	10000
1	0,30	18,92	27,34	32,92	39,96	45,18	50,37	67,51	84,62
2	0,39	24,60	35,54	42,79	51,95	58,74	65,48	87,76	110,00
3	0,46	29,01	41,92	50,47	61,27	69,28	77,23	103,51	129,74
4	0,52	32,80	47,39	57,05	69,26	78,32	87,31	117,01	146,67
5	0,57	35,95	51,95	62,54	75,92	85,85	95,70	128,27	160,77
6	0,61	38,47	55,59	66,93	81,25	91,87	102,42	137,27	172,05
8	0,68	42,89	61,97	74,61	90,57	102,42	114,17	153,02	191,80
12	0,80	50,46	72,91	87,78	106,56	120,49	134,32	180,02	225,64
18	0,91	57,40	82,94	99,84	121,21	137,06	152,79	204,78	256,67
24	1,00	63,07	91,14	109,72	133,20	150,61	167,90	225,03	282,05

Fonte: Elaboração própria a partir do banco de dados da ANA através do Portal HidroWeb.

Tabela 13: Intensidade da chuva por duração na estação GUINÉ (1241032)

Intensidade de chuvas (mm/hs)									
Tempo (horas)	Tempo (min)	2	5	10	25	50	100	1000	10000
1	60	18,92	27,34	32,92	39,96	45,18	50,37	67,51	84,62
2	120	12,30	17,77	21,40	25,97	29,37	32,74	43,88	55,00
3	180	9,67	13,97	16,82	20,42	23,09	25,74	34,50	43,25
4	240	8,20	11,85	14,26	17,32	19,58	21,83	29,25	36,67

5	300	7,19	10,39	12,51	15,18	17,17	19,14	25,65	32,15
6	360	6,41	9,27	11,15	13,54	15,31	17,07	22,88	28,68
8	480	5,36	7,75	9,33	11,32	12,80	14,27	19,13	23,97
12	720	4,20	6,08	7,31	8,88	10,04	11,19	15,00	18,80
18	1080	3,19	4,61	5,55	6,73	7,61	8,49	11,38	14,26
24	1440	2,63	3,80	4,57	5,55	6,28	7,00	9,38	11,75

Fonte: Elaboração própria a partir do banco de dados da ANA através do Portal HidroWeb.

Desta forma, com base nos resultados obtidos a curva IDF resultante é exibida na equação (5) a seguir:

$$I = \frac{267,96 \cdot TR^{0,1650}}{t^{0,616}} \quad (5)$$

Aplicando o exemplo de uma hora de chuva em intervalos de cinco minutos de duração temos os seguintes resultados:

Tabela 14: Intensidade da chuva por tempo de retorno e duração conforme curva IDF obtida.

	Duração em minutos											
TR	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
2	111,4	72,7	56,6	47,4	41,3	36,9	33,6	30,9	28,8	26,9	25,4	24,1
5	129,6	84,5	65,8	55,1	48,1	42,9	39,1	36,0	33,4	31,3	29,6	28,0
10	145,3	94,8	73,8	61,8	53,9	48,1	43,8	40,3	37,5	35,1	33,1	31,4
25	169,0	110,2	85,9	71,9	62,7	56,0	50,9	46,9	43,6	40,9	38,5	36,5
50	189,5	123,6	96,3	80,6	70,3	62,8	57,1	52,6	48,9	45,8	43,2	41,0
100	212,4	138,6	107,9	90,4	78,8	70,4	64,0	59,0	54,8	51,4	48,4	45,9
1000	310,6	202,6	157,8	132,1	115,2	102,9	93,6	86,2	80,2	75,1	70,8	67,1
10000	454,1	296,2	230,7	193,2	168,4	150,5	136,8	126,0	117,2	109,8	103,6	98,2

Fonte: Elaboração própria a partir do banco de dados da ANA através do Portal HidroWeb.

Conforme mencionado anteriormente, o *software* PLUVIO do Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da Universidade Federal de Viçosa foi consultado. No entanto, a curva proposta para o município de Mucugê gerou resultados muito superiores o que acarretou em sua desconsideração.

4.5. Hietograma de projeto

No entanto, conforme evidenciado na Tabela 14, as precipitações apresentam um padrão que já inicia em seu pico seguido por uma redução de intensidade ao longo do tempo. Porém, na realidade, as chuvas não seguem um padrão tão linear. Geralmente, iniciam com uma intensidade leve, alcançam um pico e então diminuem novamente. Para refletir esse comportamento mais realista, recorreu-se ao método dos blocos alternados. Neste método, o maior valor de intensidade de chuva deve se deslocar para a posição central do conjunto de dados seguido do segundo maior valor. O terceiro estaria anterior ao maior. O quarto após o segundo maior e assim sucessivamente, até que alternadamente o conjunto se reorganize e se apresente visualmente similar à uma curva normal, conforme ilustra a Figura 10:

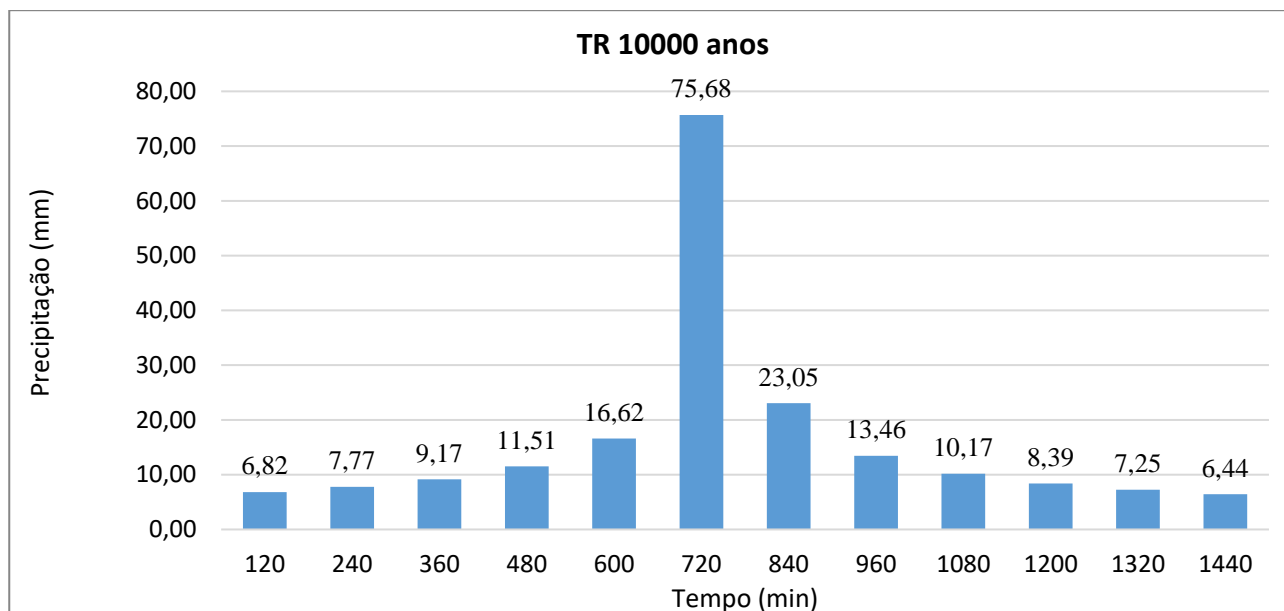


Figura 10: **Hietograma de projeto da estação GUINÉ (1241032).** Fonte: Elaboração própria a partir do banco de dados da ANA através do Portal HidroWeb.

4.6. Transformação do hietograma em hietograma excedente

Com base na extensão das bacias rurais, que pode chegar a cerca de 12.000 km², a fórmula do Corps of Engineers do exército americano (MOPU, 1987 apud SILVEIRA, 2005) é a mais adequada para a transformação do hietograma em hietograma excedente, considerando a rede de drenagem da barragem Apertado. A equação do Corps of Engineers reflete efeitos de armazenamento importantes porque estão baseadas em dados de bacias de grande porte. As demais opções ou são aplicadas para bacias urbanas ou para bacias rurais consideravelmente menores que a de Apertado. Portanto, aplicando esta metodologia, obteve-se o resultado de aproximadamente 11,7 horas, isto é, 702,9 minutos de tempo de concentração para a rede de drenagem da barragem Apertado. Neste estudo de caso foi empregado 12 horas, isto é, 720 minutos em intervalos de 120 minutos.

Determinada a equação, passa a ser necessário definir o *curve number* (CN). Segundo a ANA (2018), o método Curve Number (CN) desenvolvido pelo SCS (Soil Conservation Service, 1957) é um método simples, muito difundido e eficiente para determinar o volume aproximado de escoamento superficial de um evento de chuva em uma região. O CN é baseado na classe hidrológica do solo e no uso da terra e ocupação do solo da bacia.

O valor do Curve Number (CN) foi determinado através da análise do banco de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística referente aos tipos de solos e pedologia da bacia, levando em conta a ocupação e vegetação da área. Foi observado que o tipo de solo predominante é classificado como tipo "B" segundo a classificação hidrológica do solo proposta por Lombardi Neto et al. (1989). Como resultado, foi adotado o valor de CN=64 para a bacia da barragem, desconsiderando os afloramentos de rochas encontrados nos limites da bacia.

A Tabela 15 exibe a conformação identificada para a rede de drenagem da barragem Apertado e demonstra o cálculo do Curve Number (CN) utilizado neste estudo. Esse cálculo foi realizado com base nas tabelas de valores do parâmetro CN para bacias rurais proposto por Tucci (2004).

Tabela 15: Análise das características da bacia de drenagem para cálculo do curve number.

Ocupação/Vegetação	Parcela Ocupação(%)	CN	CN parcial
Cereais de Pequeno Pote com boa infiltração	25%	70	17,5
Hortaliças, leguminosas com boa infiltração	25%	67	16,75
Pasto não tratado com boa infiltração	25%	61	15,25
Mato ou Bosque com boa infiltração	25%	55	13,75
CN MÉDIO			63,25

Fonte: Elaboração Própria.

A próxima etapa é a elaboração do hietograma excedente. Como já mencionado anteriormente, este é o hietograma que representa a parcela da chuva que efetivamente contribui para o escoamento superficial da bacia. Para este procedimento foi adotado o método *Soil Conservation Service* – SCS.

Assim, com a duração da chuva adequada ao tempo de concentração da bacia, o CN quantificado e o resultado dos blocos alternados do hietograma de entrada, ao aplicar o método SCS, têm-se o seguinte resultado:

Tabela 16: Resultado da transformação do hietograma de entrada em hietograma excedente.

Tempo (min)	Tempo (h)	Precipitação (mm) - Resultado dos Blocos Alternados	P. Acum. (mm)	P. exc. Acum. (mm)	Hietograma Excedente (mm)
58,57	0,98	6,82	6,82	0,00	0,00
117,15	1,95	7,77	14,58	0,00	0,00
175,73	2,93	9,17	23,75	0,00	0,00
234,30	3,91	11,51	35,26	0,30	0,30
292,88	4,88	16,62	51,88	3,27	2,97
351,45	5,86	75,68	127,56	40,51	37,24
410,03	6,83	23,05	150,61	56,22	15,71
468,60	7,81	13,46	164,07	65,95	9,73
527,18	8,79	10,17	174,24	73,54	7,58
585,75	9,76	8,39	182,63	79,93	6,39
644,33	10,74	7,25	189,88	85,54	5,61
702,90	11,715	6,44	196,33	90,59	5,05

Fonte: Elaboração Própria.

4.7. Elaboração do hidrograma unitário.

A fim de transformar o hietograma excedente em hidrograma unitário, foram aplicadas as equações destacadas na Tabela 2. Essas equações são fundamentais para determinar as características do hidrograma, elemento essencial na análise hidrológica.

A Tabela 17 apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação dessas equações, utilizando os dados previamente gerados referentes à rede de drenagem da barragem Apertado. Os resultados detalhados fornecem uma compreensão mais aprofundada das características específicas do hidrograma unitário da bacia, contribuindo assim para uma avaliação mais precisa do comportamento hidrológico da região.

Tabela 17: Resultados das equações utilizadas para a construção do hidrograma unitário.

Duração da precipitação excedente		
$t_r = 0,17 \times t_c$	119,49	min
	1,99	h
Tempo de Resposta da Bacia		
$t_L = 0.6 \times t_c$	421,71	min
	7,03	h
Tempo de ocorrência de pico		
$t_p = 0.5 \times t_r + t_L$	481,46	min
	8,02	h
Tempo de Base		
$t_b = 2.67 \times t_p$	1285,49	min
	21,42	h
Vazão de pico (Vazão máxima)		
$Q_{u,p} = \frac{2,08 \times A_d}{t_p}$	293,43	m³/s.cm
	29,34	m³/s.mm

Fonte: Elaboração Própria.

Por meio da obtenção da vazão de pico e do tempo de base, torna-se viável a construção do triângulo característico que representa o hidrograma unitário. Esse processo envolve não apenas a determinação dos parâmetros hidrológicos, mas também a interpretação de seu significado em termos do comportamento hidráulico da bacia. Ao examinar o hidrograma unitário SCS exibido na Figura 11, é possível identificar padrões específicos que refletem a resposta da bacia a eventos de precipitação. Além disso, fornece insights valiosos para o planejamento e dimensionamento de estruturas de controle de enchentes e gerenciamento de recursos hídricos, contribuindo assim para uma abordagem mais eficaz na gestão de riscos de inundação e na proteção de áreas vulneráveis, fortalecendo, por conseguinte, a segurança das barragens contra eventos hidrológicos extremos.

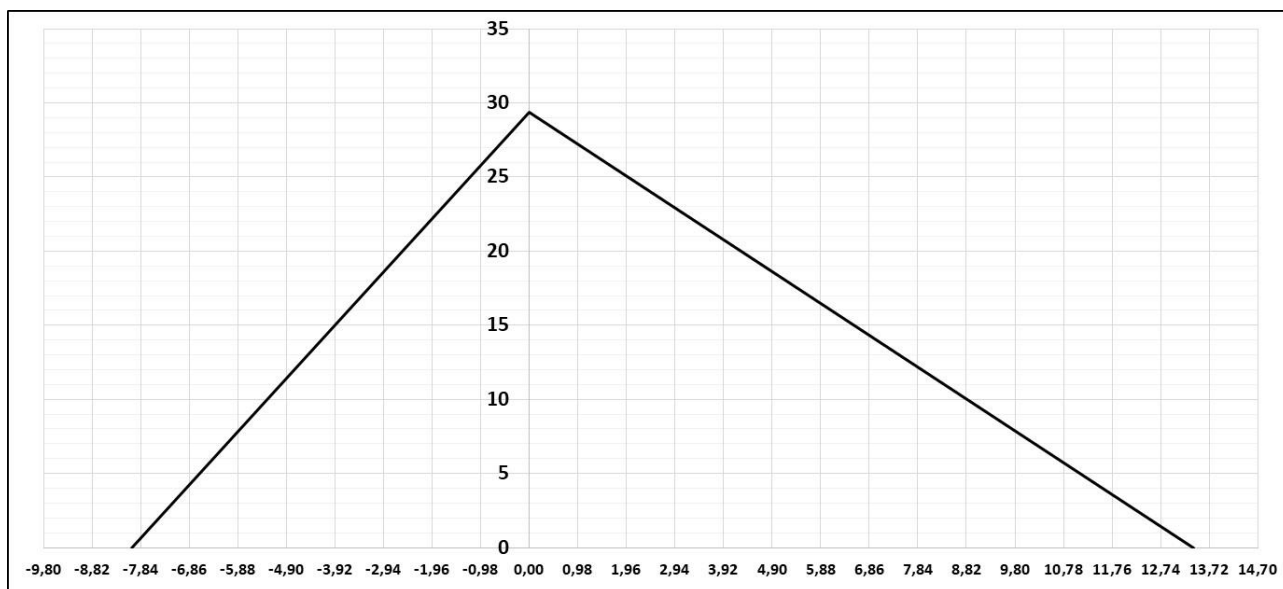


Figura 11: Hidrograma unitário SCS. **Fonte:** Elaboração Própria.

4.8. Transformação do hidrograma unitário em hidrograma de projeto

Para a transformação do hidrograma unitário em hidrograma de projeto é necessário construir uma matriz que relacione a chuva excedente (encontrada através do método SCS) e a vazão unitária retirada do gráfico. Para auxiliar esta etapa foi utilizado o *software Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) para simular a resposta da bacia de drenagem da Barragem Apertado à chuva de projeto, gerando dessa forma o hidrograma de projeto.

Dessa forma, a Tabela 18 no Apêndice 1 deste documento exibe o resultado matricial obtido. A seguir apresenta-se o hidrograma de projeto na Figura 12.

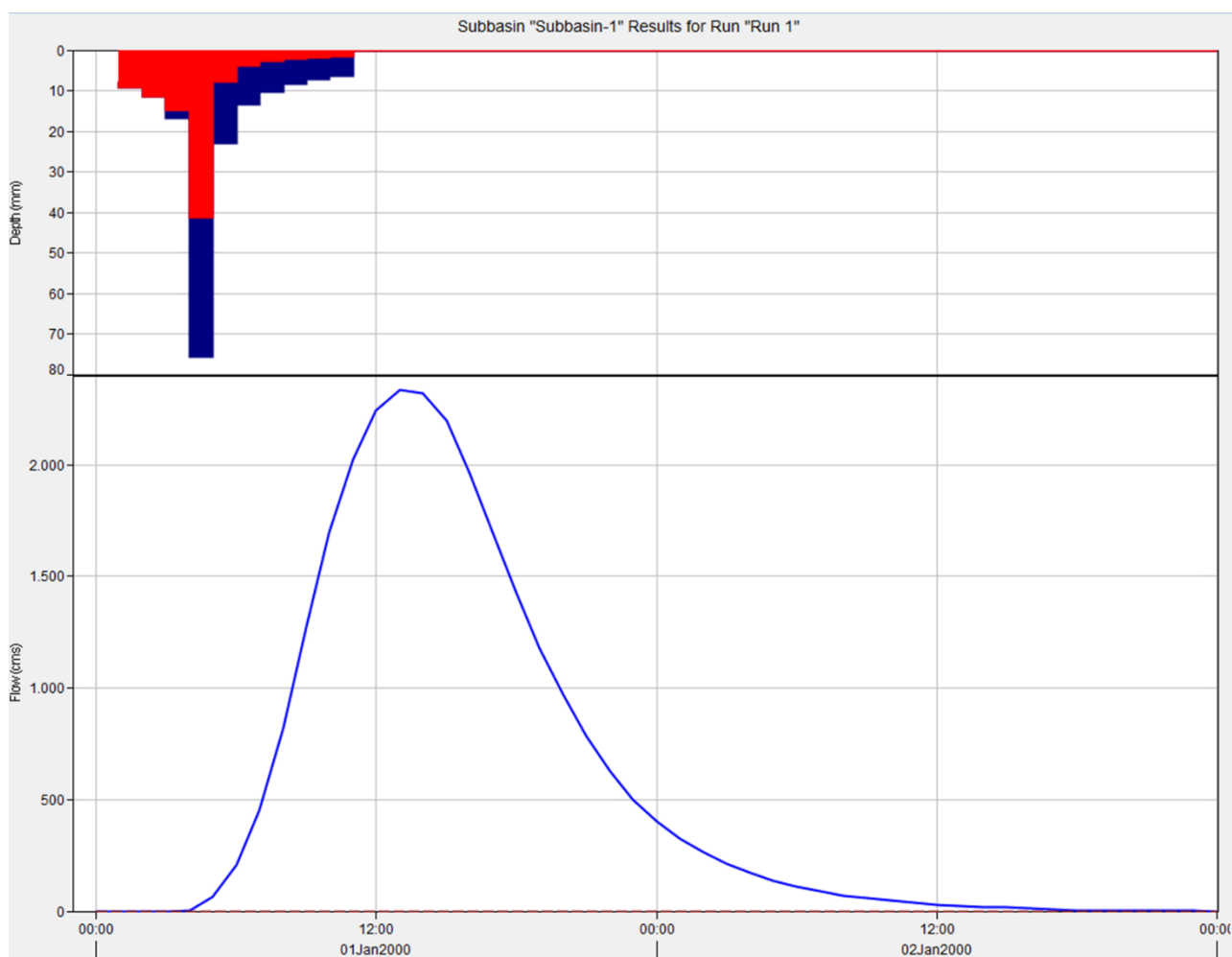


Figura 12: Hidrograma de Projeto. **Fonte:** Elaboração Própria a partir do *software* HEC-HMS

4.9. Resultados do hidrograma e constatação da segurança da barragem

A vazão de pico registrada foi de 2.336,0 m³/s, ocorrendo 780 minutos ou 13 horas após o início da chuva de projeto. Conforme exibido na Tabela 4, a vazão de projeto adotada para a barragem Apertado, considerando um período de retorno de 10.000 anos, é de 2.582,00 m³/s. Portanto, apesar dos eventos recentes que sugerem uma possível influência das mudanças climáticas no regime de chuvas da região, não foi observado um impacto significativo que comprometesse a segurança da barragem.

Carneiro et. al. (2022) realizou uma análise sobre riscos hidrológicos de falha de barragem associado às mudanças climáticas e constatou que, no contexto de eventos extremos raros, com tempo de retorno de 10.000 anos, há um aumento significativo nas magnitudes de pico de fluxo. A análise dos autores investigou a magnitude das inundações e a segurança de barragens em cenários de mudanças climáticas, utilizando um conjunto de modelos climáticos do CMIP6, acoplados a um modelo hidrológico. Os modelos revelaram uma ampla gama de níveis de risco de inundação e falha hidrológica. Metade dos cenários climáticos indicaram uma redução no período de retorno das cheias. Uma inundação associada a uma chuva de 1000 anos teve sua probabilidade de ocorrência cerca de 12 vezes maior, ou seja, precipitações intensas cada vez mais frequentes.

Embora seja encorajador saber que a barragem Apertado pode resistir a eventos extremos de chuva, é essencial não interpretar isso como uma justificativa para a complacência. O estudo realizado por Carneiro et al. ressalta a importância da avaliação hidrológica para assegurar a segurança das

barragens. Em meio às incertezas sobre o comportamento futuro das precipitações, os autores concluíram que a probabilidade de excedência da enchente histórica é de cerca de 64% para os cenários de mudança climática, indicando que o risco de falha hidrológica no futuro pode ser preocupante. Portanto, é fundamental que propostas relacionadas ao planejamento, projetos, manutenção e operação de infraestrutura levem em consideração os potenciais impactos das mudanças climáticas. Dado que as chuvas intensas ocorridas na Bahia em 2021 e 2023 parecem ter o potencial de se repetir, destaca-se a relevância da política nacional de segurança hídrica e das medidas estaduais para a segurança de barragens, especialmente ao propor a atualização dos estudos hidrológicos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados da atualização dos estudos hidrológicos indicam que a barragem Apertado demonstra uma capacidade adequada para lidar com eventos extremos de precipitação, mesmo considerando um período de retorno de dez mil anos. Estes resultados sugerem que, até o momento, as mudanças climáticas não apresentam um impacto significativo que comprometa a segurança da barragem. No entanto, é importante ressaltar que essa conclusão foi baseada em dados abrangendo um período de 40 anos.

Uma questão que permanece em aberto e que merece ser explorada em estudos futuros é a possibilidade de atualizar o hidrograma de projeto utilizando apenas os dados dos últimos 15 anos, em vez de considerar a totalidade do período disponível. Esta abordagem poderia fornecer uma perspectiva mais atualizada sobre as condições hidrológicas recentes, possibilitando uma melhor avaliação dos eventos extremos de chuva e seu impacto no risco associado à segurança da barragem.

Alternativamente, estudos hidrológicos que considerem projeções climáticas futuras podem auxiliar na promoção da segurança de barragens. Ao considerar as projeções climáticas futuras, os estudos hidrológicos podem contribuir para aperfeiçoar os procedimentos de projeto e operação das barragens, garantindo que essas estruturas estejam preparadas para enfrentar os desafios impostos pelo clima em evolução. Dessa forma, a integração de projeções climáticas nos estudos hidrológicos não apenas fortalece a base de conhecimento sobre o comportamento hidrológico, mas também reforça a capacidade de adaptação e resiliência das barragens diante das mudanças climáticas.

Além disso, o procedimento para atualizar o hidrograma de projeto é marcada por uma complexidade significativa, evidenciando as múltiplas etapas e decisões envolvidas. Desde a seleção criteriosa da estação pluviométrica até a elaboração do hidrograma final, cada fase demanda análise minuciosa e escolhas ponderadas. A preparação dos dados, a adoção de metodologias para construção dos hietogramas e a composição do próprio hidrograma exigem um denso caminho a ser percorrido, repleto de desafios e encruzilhadas.

O risco de desvios ou erros ao longo do processo destaca a relevância de um acompanhamento meticuloso e de uma orientação adequada para assegurar a integridade das análises hidrológicas. Diante da vastidão de detalhes e da necessidade de precisão em cada etapa, sugere-se a elaboração de um procedimento metodológico robusto e abrangente que norteie a revisão de vazões de projeto. A construção de um procedimento metodológico robusto não apenas atende a um anseio prático das instituições e profissionais envolvidos, mas também contribui para o avanço do conhecimento na área de hidrologia aplicada, visando alcançar resultados mais confiáveis e precisos.

Por fim, embora os resultados sugiram uma adequação atual da barragem Apertado às condições climáticas e hidrológicas, é fundamental enfatizar a importância de realizar atualizações frequentes e contínuas para monitorar a segurança das barragens. Esse aprimoramento é essencial em um contexto de clima cada vez mais instável, onde a segurança das barragens desempenha um papel crucial na mitigação dos impactos dos eventos climáticos extremos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Curve Number da Base Hidrográfica Ottocodificada**. Disponível em: <
[https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/d1c36d85-a9d5-4f6a-85f7-71c2dc801a67#:~:text=O%20método%20Curve%20Number%20\(CN,de%20chuva%20em%20uma%20região.>](https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/d1c36d85-a9d5-4f6a-85f7-71c2dc801a67#:~:text=O%20método%20Curve%20Number%20(CN,de%20chuva%20em%20uma%20região.>), acesso em 18 de março de 2024. Brasília – DF. 2018.

BAHIA. INSTITUTO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS -INEMA. **Portaria Nº 4.672 de 28 de março de 2013**. Estabelece a periodicidade de atualização, a qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem de Acumulação de Água e da Revisão Periódica de Segurança da Barragem de acumulação de água. Salvador-BA. Brasil.

BERTONI, J.C.; TUCCI, C.E.M. (2004), **Hidrologia – Ciência e Aplicação**. Porto Alegre, Brasil, Editora da Universidade Federal de Porto Alegre/ABRH, 2004, 3 ed., p177-241.

BLENKINSOP, S.; ALVES, M. L.; SMITH, A.J.P. 2021: ScienceBrief Review: **Climate change increases extreme rainfall and the chance of floods**. In: Critical Issues in Climate Change Science, edited by: C. Le Quéré, P. Liss & P. Forster. <<https://doi.org/10.5281/zenodo.4779119>>

BRASIL. **Lei Federal Nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens. Brasília-DF.

CAMPOS-ARANDA, D.F. **Cálculo de las Curvas Intensidad-Duración-Período de Retorno, a partir de Registros de Lluvia Máxima en 24 horas y Relaciones Duración-Lluvia Promedio**. Subdirección Regional Noreste de Obras Hidráulicas e Ingeniería Agrícola para el Desarrollo Rural., San Luis Potosí, 1978. p. 25.

CARNEIRO, B.L.D.S.; SOUZA FILHO, F.A.; CARVALHO, T.M.N.; RAULINO, J.B.S. **Hydrological risk of dam failure under climate change**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos Brazilian Journal of Water Resources Versão On-line ISSN 2318-0331 RBRH, Porto Alegre, v. 27, e19, 2022

CERB – Companhia de Engenharia Hídrica e Saneamento da Bahia. **Monitoramento dos Reservatórios Operados pela Cerb**. Fevereiro de 2024.

CHOW, V.T; MAIDMENT, D.R; MAYS, L.W. **APPLIED HYDROLOGY**. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering from the McGraw-Hill Book Company. International Edition, 1988.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. 1. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013. v. 1. 336p.

DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Guia prático para projetos de pequenas obras hidráulicas**. São Paulo, 2005.

DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Manual de cálculo de vazões máximas, médias e mínimas para as bacias hidrográficas do estado de São Paulo**. São Paulo, 1994.

FOSTER, M. A.; FELL, R.; SPANNAGLE M. **Analysis of embankment dam incidents**. Sydney: The University of South Wales, 1998. 282 p.

FRANCO, C.S.S.P.A. **Segurança de Barragens: Aspectos Regulatórios**. Dissertação para obtenção do título de mestre apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente da Universidade Federal de Goiás, Goiânia. 2008.

FREITAS E.S. **Determinação e Comparação de Curvas IDF com Dados Pluviográficos e Pluviométricos na Bacia Hidrográfica Experimental do Riacho Guaraíra- PB**. Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa – PB, 2016.

GRUPO DE PESQUISA EM RECURSOS HÍDRICOS. **Mapa de Chuvas Intensas para o Brasil**. Departamento de Engenharia Agrícola – DEA. Universidade Federal de Viçosa. Disponível em: <<https://www.gprh.ufv.br/?area=softwares>>, acesso em 10 de março de 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA -IBGE. **Informações Ambientais – Geociências**. Disponível em <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia.html>>, acesso em abril de 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Balanço Pluviométrico de dezembro de 2023 em Salvador (BA)**. Publicado em 3 de janeiro de 2024, disponível em: https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/BALANÇO_-SALVADOR_DEZEMBRO_2023-r.pdf, acesso em 07 de março de 2024.

JANSEN, R.B. **Dams and public safety – A Water Resources Technical Publication**. U.S Department of the Interior. Bureau of Reclamation. USA. 1983.

LOMBARDI NETO, F.; BELLINAZZI JÚNIOR, R.; GALETI, P. A.; BERTOLINI, D.; LEPSCH, I. F.; OLIVEIRA, J.B. **Nova abordagem para cálculo de espaçamento entre terraços**. Simpósio sobre terraceamento agrícola. Campinas, 1989.Fundação Cargill. p. 99-124

MARENGO, J. A. **Heavy rainfall associated with floods in southeastern Brazil in November–December 2021**. Natural Hazards, Springer Nature, 20 de janeiro de 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05827-z>.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

PEREIRA, G.M. **Descrição de Casos de Rupturas de Barragens a Partir da Década de 50, em Âmbito Mundial**. Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Mestrado Profissional em Defesa e Segurança Civil da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção de grau de Mestre em Defesa e Segurança Civil. Niterói – RJ. 2017.

PINTO, N. L. S.; HOLTZ, A.C.T.; MARTINS, J.A.; GOMIDE, F.L.S. **Hidrologia Básica**. Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo - SP, 1976.

PORTAL DA CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Meio Ambiente, Mudanças Climáticas e Rompimento de Barragens**. Observatório Parlamentar da Revisão Periódica Universal. Texto redigido por: Évellyn Christinne Brühmüller Ramos, Henrique Paranhos Sarmiento Leite, Kenya Carla Cardoso Simoes, Maurício Boratto Viana, Maurício Schneider – CONLE. Brasília-DF, 2021.

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA HÍDRICA E SANEAMENTO – SIHS. **Documentos relativos à prestação de serviços de assessoria técnica nas áreas de infraestrutura hídrica, revitalização de bacias hidrográficas, abastecimento de água e esgotamento sanitário executados no ano de 2017 na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.** Salvador-BA, 2017.

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA HÍDRICA E SANEAMENTO – SIHS. **Projetos Estratégicos de Segurança de Barragens - Catálogo de Barragens Estratégicas da Bahia.** Salvador-BA, 2018.

SANSIGOLO, C. A.. **Distribuições de extremos de precipitação diária, temperatura máxima e mínima e velocidade do vento em Piracicaba, SP (1917-2006).** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 23, n. 3, p. 341-346, 2008.

SILVEIRA, A.L.L. **Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais.** RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Volume 10, N°1. Março de 2005.

SILVEIRA, G.M. **Análise de Sensibilidade de Hidrogramas de Projeto aos Parâmetros de sua Definição Indireta.** Dissertação apresentada à escola politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. São Paulo – SP. 2010.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**, Editora Mc Graw Hill, São Paulo. 1975. 245p.

APÊNCIDE 1

Resultado matricial da elaboração do hidrograma de projeto

Tabela 18: Resultado da matriz de conversão da chuva em vazão.

Data	Horário	Minutos	Vazão (m³/s)
01/jan/00	00:00	0	0
01/jan/00	01:00	60	0
01/jan/00	02:00	120	0
01/jan/00	03:00	180	0
01/jan/00	04:00	240	2,6
01/jan/00	05:00	300	61,5
01/jan/00	06:00	360	209,5
01/jan/00	07:00	420	451,5
01/jan/00	08:00	480	819,9
01/jan/00	09:00	540	1273,3
01/jan/00	10:00	600	1694,5
01/jan/00	11:00	660	2024,1
01/jan/00	12:00	720	2245,1
01/jan/00	13:00	780	2336,0
01/jan/00	14:00	840	2319,7
01/jan/00	15:00	900	2198
01/jan/00	16:00	960	1960,2
01/jan/00	17:00	1020	1684,5
01/jan/00	18:00	1080	1423,7
01/jan/00	19:00	1140	1180,5
01/jan/00	20:00	1200	968,3
01/jan/00	21:00	1260	783,4
01/jan/00	22:00	1320	624,4
01/jan/00	23:00	1380	500,2
02/jan/00	00:00	1440	403,8
02/jan/00	01:00	1500	325,3
02/jan/00	02:00	1560	261,8
02/jan/00	03:00	1620	210,3
02/jan/00	04:00	1680	169,2
02/jan/00	05:00	1740	136,4
02/jan/00	06:00	1800	110
02/jan/00	07:00	1860	88,5
02/jan/00	08:00	1920	71,2
02/jan/00	09:00	1980	57,3
02/jan/00	10:00	2040	46,3
02/jan/00	11:00	2100	37,6
02/jan/00	12:00	2160	30,5
02/jan/00	13:00	2220	24,8
02/jan/00	14:00	2280	19,9
02/jan/00	15:00	2340	15,6

02/jan/00	16:00	2400	11,6
02/jan/00	17:00	2460	7,9
02/jan/00	18:00	2520	5
02/jan/00	19:00	2580	3,2
02/jan/00	20:00	2640	1,9
02/jan/00	21:00	2700	1,1
02/jan/00	22:00	2760	0,5
02/jan/00	23:00	2820	0,1
03/jan/00	00:00	2880	0

Fonte: Elaboração Própria.