

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS

Graduação em Engenharia Civil

**Avaliação de precipitações extremas na bacia do rio
Paraguaçu para fins de projeto de barragens.**

Aprovado em: 10/12/2020

Examinadores:

Profa. Andrea Sousa Fontes
Universidade Federal do Recôncavo da
Bahia

Ass.:



Prof. Jorge Luiz Rabelo
Universidade Federal do Recôncavo da
Bahia

Ass.:



Profa. Mariese Conceição Alves dos
Santos
Universidade Federal do Recôncavo da
Bahia

Ass.:



ÍCARO ANSELMO NASCIMENTO DE CARVALHO

CRUZ DAS ALMAS, BAHIA

2020

Avaliação de precipitações extremas na bacia do rio Paraguaçu para fins de projeto de barragens.

Ícaro Anselmo Nascimento de Carvalho¹ & Andrea Sousa Fontes²

RESUMO

Após os últimos acidentes envolvendo barragens em território nacional, o setor de segurança de barragens buscou trazer cada vez mais discussões acerca da importância de monitoramento, controle, e boas práticas de engenharia para a construção e dimensionamento destas obras, que envolvem também estudos hidrológicos para previsões de cheias. Nesse contexto, esse estudo buscou avaliar as precipitações extremas na bacia do rio Paraguaçu, fazendo o uso de estações pluviométricas da região, e também espacializar as precipitações extremas e risco hidrológico na região, para fins de embasar projetos de barragens. Por fim essas informações foram analisadas no contexto de 6 grandes barragens localizadas na bacia de estudo. Os resultados mostram que na região da barragem de França, considerando um risco hidrológico de 0,1% em função de um TR de 1000 anos, a precipitação extrema foi de 267 mm/dia. Dentre os resultados para o restante das barragens, o maior risco associado, considerando a Precipitação Máxima Provável, foi de 8,03 E-07%, para a região da barragem de Bandeira de Melo, com uma PMP associada de 548 mm/dia, sinalizando riscos reduzidos na região.

Palavras-chave: Segurança de Barragens; Risco Hidrológico; PMP

ABSTRACT

After the last accidents involving dams in national territory, the dam safety sector sought to bring more and more discussions about the importance of monitoring, control, and good engineering practices for the construction and dimensioning of these works, which also involve hydrological studies for predictions flooding. In this context, this study sought to assess extreme rainfall in the Paraguaçu River basin, making use of the region's rainfall stations, and also to spatialize extreme rainfall and hydrological risk in the region, for the purpose of supporting dam projects. Finally, this information was analyzed in the context of 6 large dams located in the study basin. The results show that in the France dam region, considering a 0.1% hydrological risk due to a 1000-year RT, the extreme precipitation was 267 mm / day. Among the results for the rest of the dams, the highest associated risk, considering the Probable Maximum Precipitation, was 8.03 E-07%, for the region of the Bandeira de Melo dam, with an associated PMP of 548mm / day, signaling reduced risks in the region.

Keywords: Dam Safety; Hydrological Risk; PMP

¹ Graduando em Engenharia Civil da UFRB. e-mail: icaro.anc@gmail.com

² Professora Associada, CETEC/UFRB – Campus Cruz das Almas, Bahia. e-mail: andreafontes@ufrb.edu.br

1 – INTRODUÇÃO

Entende-se como barragem, uma estrutura construída em uma seção de um curso d'água com a finalidade de conter ou acumular água, substâncias líquidas ou até mistura de líquidos e solos (ANA, 2019).

Essa obra hidráulica vem sendo praticada há milhares de anos ao longo da civilização, e viabilizou o surgimento e desenvolvimento de diversas atividades, como agricultura e pecuária. Entretanto, nos dias atuais, esses são só mais alguns dos usos possíveis para um barramento, aos quais se adicionam a regularização de vazões, abastecimento urbano, geração de energia elétrica por meio das hidrelétricas, e também utilizadas para contenção de resíduos e rejeitos industriais ou de mineração (DO CARMO, 2013).

Ao avaliar a estabilidade física da barragem, devem ser avaliadas a segurança física e a segurança hidráulica dessas estruturas (QUEIROZ et al., 2017). Sendo uma barragem uma obra que requer uma gestão de risco adequada, cuidados em projeto, dimensionamento, construção e monitoramento constante são imprescindíveis, visto que algumas dessas obras representam alto dano socioeconômico no caso de ruptura ou falha no vale jusante (LADEIRA, 2019).

O Relatório de Segurança de Barragens 2019 (RSB, 2019) relatou um aumento em acidentes quando comparado ao ano anterior. Foram 12 acidentes e 58 incidentes com barragens, ao longo de 15 diferentes estados. Entre esses acidentes, está o maior acidente com barragens verificado em território nacional: o rompimento da Barragem I da mina Córrego do Feijão, em Brumadinho – MG, catástrofe que resultou 270 vítimas fatais, e mais de 40 mil afetados, totalizando um prejuízo socioeconômico da ordem de bilhões de reais. Aliado a esse fato, sabe-se que a falta de controle hidrológico, no longo prazo é uma das causas de ruptura mais frequentes de barragens de rejeito (CHAMBERS e HIGMAN, 2011, apud QUEIROZ et al., 2017).

Para orientar os responsáveis pela construção de empreendimentos de barragens no país, o Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens (2016) determina que dentre os variados estudos hidrológicos de fundamental importância para os projetos de barragens, é necessário a estimativa do valor da variável Precipitação Máxima Provável (PMP), fazendo o uso do “*Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP)*” publicado pela Organização Mundial de Meteorologia (WMO, 2009).

A variável PMP, por sua vez é definida como o valor teórico máximo de precipitação, para uma certa duração de chuva numa bacia hidrográfica, e pode ser determinado por várias metodologias. Entretanto, a metodologia de Hershfield (1965), recomendada pela WMO (2009), devido a sua abordagem estatística, necessita apenas de séries históricas pluviométricas para cálculo, o que torna essa opção, considerando a realidade brasileira de escassez de dados meteorológicos, a mais viável, mesmo com as limitações quanto as regionalizações de seus parâmetros (SANTOS, 2019).

Na bacia hidrográfica do Rio Paraguaçu existem diversos barramentos, entre eles, a hidrelétrica da Pedra do Cavalo que merece atenção, pois é de extrema importância para a região por abastecer vários municípios e dois importantes centros metropolitanos, Feira de Santana e

Salvador, e também detém a função de regular as enchentes que outrora afetavam os municípios de Cachoeira e São Félix (LAMAS et al, 2016).

Dessa forma, mostra-se necessário o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem na previsão de eventos extremos de precipitação e no conhecimento do seu comportamento em bacias hidrográficas com presença de barramentos. Sendo assim, o presente estudo tem como objetivo avaliar as precipitações extremas na bacia do Rio Paraguaçu, por meio de séries históricas de pluviômetros presentes na área de estudo, e uma planilha automatizada desenvolvida pelos autores (PMPCalc), para calcular precipitações extremas, tempo de retorno e risco hidrológico. Além disso, buscou-se aplicar a interpolação pelo inverso da potência da distância (IDW) para elaborar mapas e espacializar as precipitações e riscos hidrológicos obtidos, para fins de projeto de barragens.

2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O “*Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP)*”, publicado pela Organização Mundial de Meteorologia (WMO, 2009), define a Precipitação Máxima Provável (PMP) como o valor teórico máximo de precipitação, para uma certa duração de chuva numa bacia hidrográfica.

Burger (2014) cita que a PMP era anteriormente chamada de Precipitação Máxima Possível, mas como historicamente valores de chuva superaram os valores estimados da PMP, esta recebeu o nome de Precipitação Máxima Provável, devido à natureza incerta dessas previsões.

O manual da WMO (2009) também cita os principais tipos de cálculo de PMP:

- a) Método local: faz-se uma maximização de tempestades que acontecem na localidade, utilizando-se dados de dentro da área da bacia;
- b) Método da transposição: transpõe-se as características de uma tempestade de um lugar aos arredores, para dentro da área de onde se faz o estudo;
- c) Método da combinação: maximiza-se e combina-se mais de uma tempestade para cálculo.
- d) Método inferencial: utiliza-se um modelo em 3-D, e desse modelo, extrai-se equações físicas, que caracterizarão uma tempestade, e então valores de chuva;
- e) Método generalizado: utilizado quando há tempestades distribuídas homogeneamente em uma grande área. Estima-se a PMP para essa seguinte situação.
- f) Método estatístico: faz-se o uso de eventos passados, ou seja, séries históricas de pluviômetros, e em seguida, faz-se uma análise da distribuição de frequências para obter então as precipitações máximas.

Quando a abordagem é meteorológica, necessita de variáveis como dados físicos da bacia hidrográfica, altimetria do terreno, temperatura, velocidade do vento, algumas dessas

escassas em território nacional. Entretanto, quando há dados suficientes para calibração e operação, as previsões podem ser satisfatórias, como verificado por Ohara et al. (2011) nos seus estudos no Rio American na Califórnia, e por Rodrigues et al. (2015), que analisaram precipitações na zona urbana de Maceió e na Zona da Mata de Alagoas.

Por outro lado, a abordagem estatística, recomendada pela WMO (2009) faz uso da envoltória de Hershfield (1965), que consiste no uso de séries históricas pluviométricas para calcular essas precipitações extremas, uma vez que os dados de estações pluviométricas são mais acessíveis ao público e podem ser baixados com facilidade, o que torna essa metodologia na maioria das vezes como a alternativa mais viável.

Santos (2019) realizou uma análise do método estatístico para a estimativa da Cheia Máxima Provável (CMP), utilizando a UHE de Sobradinho como área de aplicação de estudo, e concluiu que os resultados obtidos para a PMP calculados a partir do fator de frequência da envoltória de Hershfield são mais conservadores do que quando calculados a partir do fator de frequência local.

O estudo de Neto et al. (2018), determinou a PMP para 10 estações pluviométricas inseridas na Bacia de Manuel Alves, e concluiu que os valores obtidos estavam compatíveis quando comparados a outros estudos na área. Os autores reforçam ainda que é de extrema importância o monitoramento hidrológico dessas variáveis na área, uma vez que ali há uma série de barragens “Pequenas Centrais Hidrelétricas” (PCH).

Sabe-se que a metodologia de Hershfield é recomendada para bacias até 1000 km² (WMO, 2009), desse modo, diversos autores espacializam a chuva para construção de mapas, utilizando-se de diferentes métodos de interpolação. Ao analisar métodos de interpolação para espacialização de precipitação pluvial na região Norte do Espírito Santo, Magalhães et al. (2013), compararam as interpolações Inverso da Potência da Distância (IDW), Krigagem Esférica, Spline e Trend, e ao compararem os resultados com valores auferidos na área, concluíram que o método de melhor desempenho é o IDW.

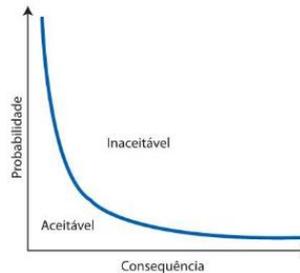
A espacialização da chuva pela interpolação pelo Inverso da Potência da Distância (IDW) apresenta bons resultados quando aplicada a variáveis climáticas, por possuir base teórica na Lei de Coulomb e Lei da Gravitação Universal (NETO et al., 2018) e foi utilizada por Neto et al. (2018), e Jesus e Nascimento (2018), para apresentar o comportamento das precipitações em mapa.

Variáveis importantes para o monitoramento hidrológico, e que geralmente acompanham a análise da PMP são o tempo de retorno (TR) e o risco hidrológico. O tempo de retorno (TR) é definido como o intervalo médio de tempo em anos, decorrente entre dois valores de precipitação máxima, iguais ou superiores à PMP, subsequentes. Atribui-se comumente para o risco hidrológico como este sendo igual a probabilidade na qual um evento extremo seja igualado ou excedido, também denominada de probabilidade de excedência. (COLLISCHONN e DORNELLES, 2015).

Entretanto, não é sempre que o risco é sinônimo de probabilidade de excedência, pois para certas aplicações, o risco é comumente avaliado em conjunto às suas consequências e

possíveis fatores agravantes (COLLISCHONN e DORNELLES, 2015), como mostrado é na Figura 1.

Figura 1 - Curva de risco constante, relacionando aceitabilidade de riscos mediante análise probabilidade x consequência.



Fonte: Meyland et al., 2012 apud Collischonn e Dornelles, 2015

Eventos que possuem uma probabilidade maior de ocorrência, possuem consequências de menor gravidade para a sociedade. Analogamente, consequências mais severas, como catástrofes, possuem uma probabilidade menor de ocorrência. Desse modo, convencionam-se subjetivamente os riscos que são aceitáveis para a sociedade, bem como os que não são. Essas variáveis encontram-se representadas por um gráfico de probabilidade *versus* consequência, sendo a linha azul como um risco relativamente constante (COLLISCHONN e DORNELLES, 2015).

Sendo assim, diversos autores já realizaram estudos investigando a interação entre PMP e Tempo de Retorno. A exemplo disso, Cavalcanti et al. (2018) buscaram em seu estudo estimar a PMP em Recife-PE, usando dados pluviométricos disponíveis na área, aplicando a metodologia de Hershfield (1965). Além disso, utilizaram distribuições teóricas para calcular a PMP para diferentes valores de TR, e apontaram que os resultados devem balizar ações da defesa civil e planejamento urbano, para mitigação de danos socioeconômicos.

Outros exemplos de trabalhos que relacionaram PMP e TR são os de Guimarães et al. (2015), que estudaram as precipitações máximas para diferentes TR além de avaliarem também a aderência das precipitações máximas diárias anuais ao modelo probabilístico de Gumbel, respondendo satisfatoriamente as análises realizadas, e o trabalho de Jesus e Nascimento (2018), que fizeram a espacialização das precipitações máximas para diversos TR no estado da Bahia, e concluíram assim que a faixa litorânea do estado possui maior propensão a precipitações elevadas.

Para avaliar a interação entre a PMP e o risco hidrológico, Conceição (2019) estudou quatro barragens no estado da Bahia, e notou que os riscos obtidos por Hershfield são consideravelmente menores quando comparados aos riscos calculados pelo fator de frequência local, e, portanto, consiste numa metodologia mais conservadora. Já os resultados obtidos pela análise do fator de frequência local se mostraram com riscos altos e inadequados para dimensionamento.

No Manual do Empreendedor para Segurança de Barragens (ANA, 2016), é postulado que a CMP deverá ser calculada recorrendo a modelos de precipitação-escoamento (também denominado chuva-vazão), mas tendo como base a variável PMP, calculada pela metodologia de Hershfield para tal. A escolha do TR para o cálculo da PMP e CMP é função da altura da

barragem e do volume retido por esta, que combinados retornam um TR mínimo (ou recorrência) a ser considerado para cálculo, conforme Quadro 1.

Quadro 1 – Tempos de retorno mínimos recomendados para cheia de projeto.

Altura, h (m)	Volume, V (hm ³)	Tempo de recorrência (anos)
$h \geq 30$	$V \geq 50$	CMP
$15 \leq h < 30$	$03 \leq V < 50$	1000
$h < 15$	$V < 03$	500

Fonte: Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens – ANA (2016)

O manual ainda recomenda nos casos de ausência de dados para estimativa da PMP, utilizar o valor da cheia correspondente ao TR de 10 000 anos (ANA, 2016).

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – Área de estudo

A área de estudo consiste na bacia hidrográfica do Rio Paraguaçu, que se localiza no estado da Bahia, possuindo uma área de aproximadamente 54.474,19 km², e 84 municípios. Com 600 km de extensão, possuindo a nascente no município da Barra da Estiva, localizado na Chapada diamantina, e então desemboca na Baía de Todos os Santos entre os municípios de Maragogipe e Saubara. (LAMAS et al., 2016). A localização da bacia está representada na Figura 2.

Figura 2 – Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Paraguaçu



Fonte: GONÇALVES, 2014

Ao longo do curso do rio, no alto curso, o clima varia de semiúmido a úmido, com precipitação próxima a 900 mm anuais, com período de estiagem no inverno, e abriga o bioma Cerrado. No seu médio curso, abriga-se majoritariamente o semiárido, que é caracteriza-se por altas temperaturas e precipitações irregulares totalizando a algo próximo a 700 mm anuais. Do médio curso ao baixo curso, encontra-se clima semiúmido a úmido, com temperaturas elevadas, enquanto o índice pluviométrico aumenta gradativamente ao passo em que se aproxima do litoral. Já no baixo curso, as chuvas são abundantes o ano todo, com índices superiores a 1300mm anuais e mais concentradas entre abril e junho, devido às frentes frias de inverno (LAMAS et al., 2016).

3.2 - Levantamento e Tratamento de Dados

Após um levantamento das barragens do local, utilizando-se o inventário do INEMA detectou-se a existência de 94 barragens dentro da bacia do rio Paraguaçu. Entretanto, foram selecionadas 6 barragens para a aplicação nesse estudo: Apertado, Bandeira de Melo, Baraúnas, França, Pedra do Cavalo e São José do Jacuípe, em função da disposição das estações pluviométricas (INEMA, 2020). A Tabela 1 apresenta o levantamento das barragens utilizadas no estudo, bem como suas informações mais importantes.

Tabela 1 – Barragens utilizadas no estudo e suas informações

Barragem	Altura (m)	Comprimento (m)	Capacidade de (hm ³)	Material	Município	Usos
Apertado	27,2	701,8	108,69	Terra	Mucugê	Abastecimento/ Irrigação
Bandeira de Melo	19,1	1160,00	111,59	Outro	Boa Vista do Tupim / Itaetê	Abastecimento/ Irrigação
Baraúnas	34,5	347,00	23,71	CCR	Seabra	Abastecimento/ Irrigação
França	25,5	420,00	33,17	Terra-Enrocamento	Piritiba/ Miguel Calmon	Abastecimento/ Regularização de vazões
Pedra do Cavalo	142,5	470,00	4630,96	Terra-Enrocamento	Governador Mangabeira / Cachoeira	Abastecimento/ Irrigação
São José do Jacuípe	41	1560,00	357,00	Terra-Enrocamento	Várzea da Roça / São José do Jacuípe	Abastecimento/ Irrigação

Fonte: INEMA, 2020

A barragem de Apertado preocupa o INEMA/BA por alguns fatores, tais como: abatimento no talude de montante, abertura de fissuras, rachaduras e cavidades no talude de jusante, desgaste no concreto com aparecimento das barras de aço em alguns pontos da galeria, e também fissuras em na laje sugerindo reação do gel álcali-agregado (RAA), além de alguns pontos obstruídos por vegetação (Relatório de Segurança de Barragens - RSB , 2019).

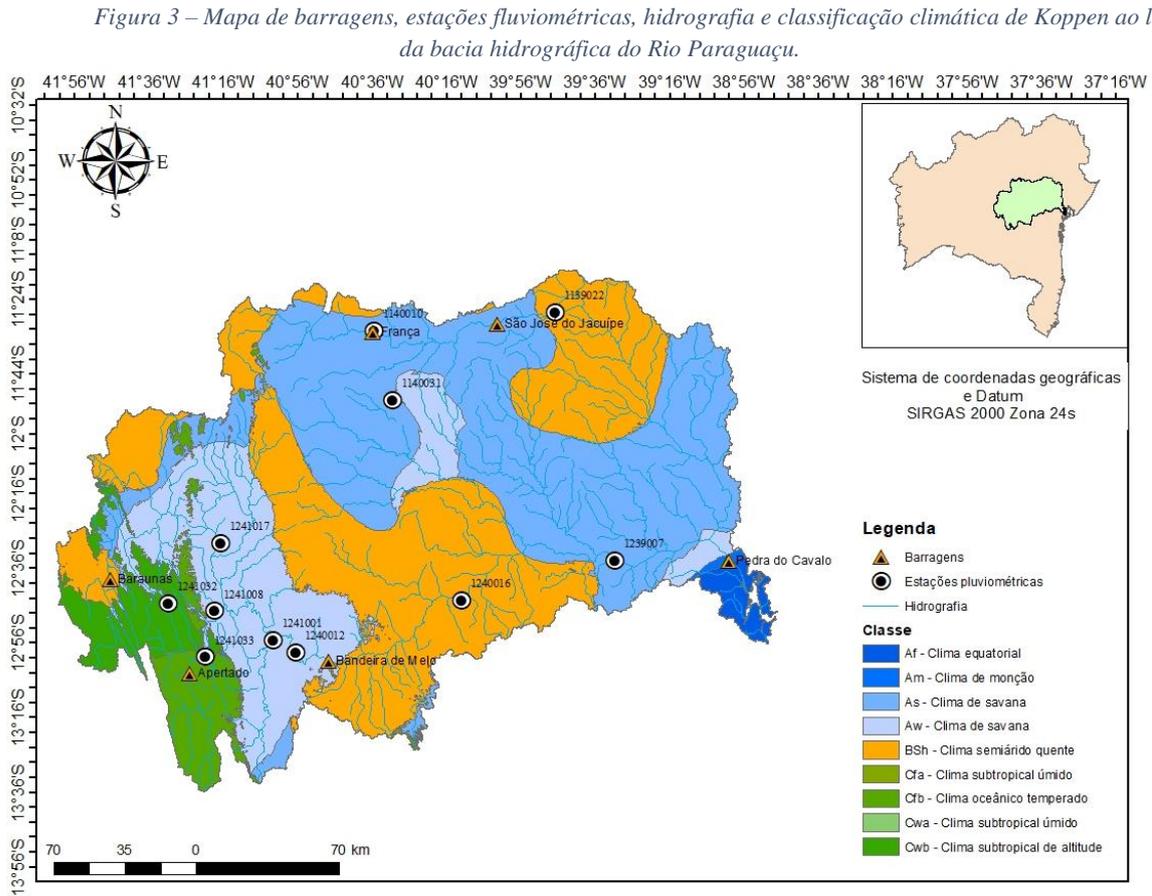
A barragem de Pedra do Cavalo localiza-se entre os municípios de Governador Mangabeira e Cachoeira, foi construída pela parceria entre Desenvale e o Governo da Bahia, possuindo mais de vinte anos de existência. É uma importante barragem pois é a responsável pelo abastecimento de água para Região Metropolitana de Salvador, além de funcionar também como controle de cheias, e geração de energia (CERB, 2020).

Dentro da bacia hidrográfica selecionada, há 16 estações pluviométricas gerenciadas pela CPRM. Como o cálculo será realizado pela planilha de cálculo PMPCalc, ferramenta desenvolvida pelos autores que requer no mínimo 30 anos de dados válidos na série histórica para o funcionamento, foi feita a investigação acerca da quantidade de anos disponíveis em cada estação, e foram selecionadas para este estudo, apenas aquelas com mais de 30 anos válidos de dados, como mostrado na Tabela 2. Além disso, foi elaborado um mapa com a hidrografia, e as localizações das estações pluviométricas e das barragens, conforme Figura 3.

Tabela 2: Estações pluviométricas na bacia hidrográfica do Rio Paraguaçu consideradas no estudo.

Estação	Código	Período	30 Anos Válidos
França	1140010	01/03/1965 – 01/03/2020	Sim
Gavião II	1139022	01/02/1983 – 01/03/2020	Sim
Barra do Mundo Novo	1140031	01/06/1984 – 01/03/2020	Sim
Fazenda Ribeiro	1241027	01/12/1976 – 01/03/2020	Não
Estação Experimental	1241028	01/10/1991 – 01/03/2020	Não
Ipirá	1239042	01/06/2005 – 01/03/2020	Não
Utinga	1241026	01/12/1976 – 01/03/2020	Não
Porto	1241017	01/07/1941 – 01/03/2020	Sim
Ibiquera	1240034	01/06/2005 – 01/01/2020	Não
Iaçu	1240016	01/08/1944 – 01/03/2020	Sim
Argoim	1239007	01/09/1959 – 01/03/2020	Sim
Guiné	1241032	01/05/1984 – 01/03/2020	Sim
Andaraí	1241008	01/07/1943 – 01/03/2020	Sim
Usina Mucugê	1241033	01/03/1985 – 01/03/2020	Sim
Fazenda Iguaçú	1241001	01/06/1969 – 01/03/2020	Sim
Itaeté	1240012	01/11/1933 – 01/03/2020	Sim

Fonte: Próprio autor, 2020



Fonte: Próprio autor, 2020.

Fazendo o uso do Quadro 1, e as informações de capacidade e altura levantadas acerca das barragens na Tabela 1, é possível classifica-las em função de qual tempo de recorrência será usado para calcular a cheia de projeto, resultando na Tabela 3.

Tabela 3: TR necessário para cálculo de eventos extremos para cada barragem

Barragem	Altura (m)	Capacidade de (hm ³)	Critério de Projeto
Apertado	27,2	108,69	CMP
Bandeira de Melo	19,1	111,59	CMP
Baraúnas	34,5	23,71	CMP
França	25,5	33,17	TR = 1000
Pedra do Cavalo	142,5	4630,96	CMP
São José do Jacuípe	41	357,00	CMP

Fonte: Próprio autor, 2020

3.3 – Base de Cálculo:

3.3.1 – Metodologia de cálculo da Precipitação Máxima Provável por Hershfield

O valor da PMP é definido a partir da equação geral de frequência, Equação 1.

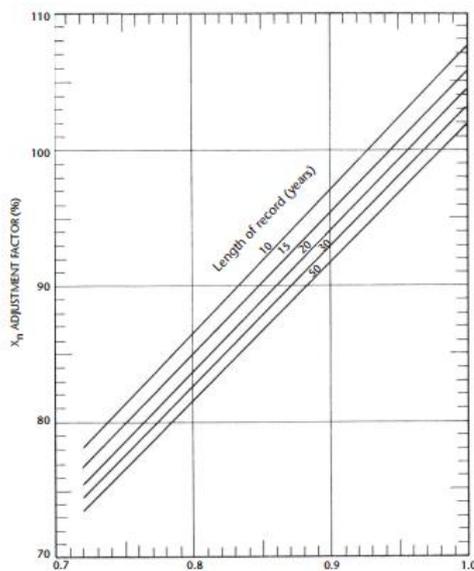
$$X_{PMP} = \bar{X}_n + K_m \cdot S_n \quad (1)$$

Onde:

- X_{PMP} = Valor da Precipitação Máxima Provável;
- \bar{X}_n = Média da série considerada (corrigido de acordo com a envoltória da Figura 4);
- K_m = Fator de Frequência;
- S_n = Desvio padrão da amostra (corrigido de acordo com a envoltória da Figura 5).

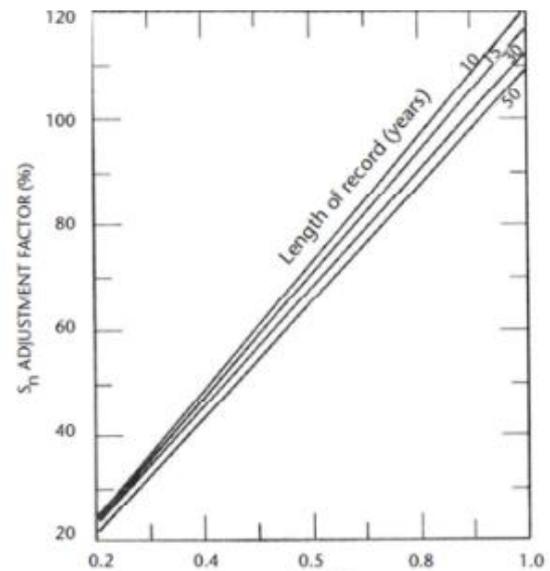
As correções referentes à média e ao desvio padrão foram propostas por Hershfield (1965) e consistem em ajustes para evitar ou minimizar a presença de outliers, representados pelas Figuras 4 e 5.

Figura 4 - Ajuste para a média da série de dados anuais



Fonte: WMO, 2009

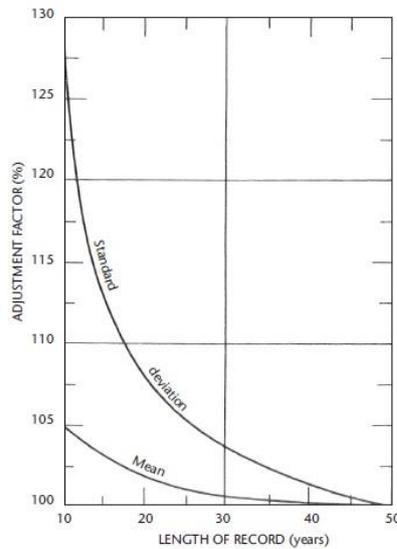
Figura 5 - Ajuste para o desvio padrão da série de dados anuais



Fonte: WMO, 2009

Sabe-se que o valor da média e o valor do desvio padrão da série histórica tendem a aumentar de acordo com o tamanho da amostra, devido ao fato de que a distribuição de frequência de valores extremos de chuva é assimétrica com cauda para direita (NETO et al., 2018). Desse modo, outro ajuste a ser realizado é em função do tamanho da série histórica considerada (WMO, 2009), representado pela Figura 6.

Figura 6



Fonte: WMO, 2009

O fator de frequência (K_m) representado na Equação 1 poderá ser obtido de duas formas, via Local ou via Hershfield. O fator de frequência “K” Local, é definido de acordo com a Equação 2.

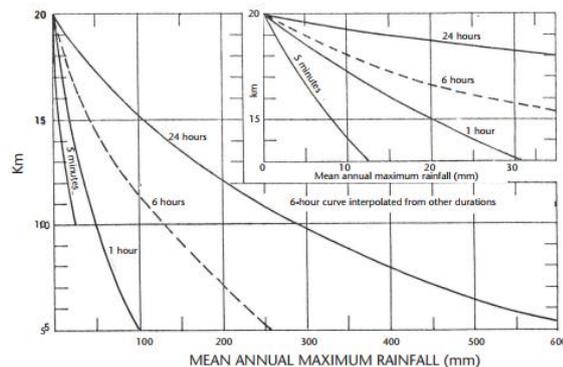
$$K_m = \frac{X_{m\acute{a}x} - \bar{X}_{n-1}}{S_{n-1}} \quad (2)$$

Onde:

- $X_{m\acute{a}x}$ = Valor máximo de chuva da série dos anos considerados;
- \bar{X}_{n-1} = Valor da média retirando-se o valor máximo;
- S_{n-1} = Desvio padrão da amostra retirando-se o valor máximo.

Para o fator de frequência “K” por Hershfield, este deverá ser obtido por análise gráfica da envoltória de Hershfield, representada na Figura 7. Para obter o “K” de Hershfield, utiliza-se o valor da média das máximas anuais, e a envoltória correspondente a chuva de 24 horas, já que os dados das estações pluviométricas correspondem a chuvas diárias.

Figura 7 – K em função da média das precipitações máximas anuais da série e durações de chuva



Fonte: WMO, 2009

3.3.2 – Tempo de retorno e risco hidrológico, calculados a partir de um valor de precipitação.

Sabendo que o tempo de retorno é matematicamente definido como sendo o inverso da probabilidade de excedência, que por sua vez, é a probabilidade “P” de que um evento (ou nesse caso, evento de precipitação) igual ou superior ocorra, representado pela Equação 3.

$$TR = \frac{1}{P} \quad (3)$$

O risco hidrológico por sua vez, irá corresponder a probabilidade existente do valor da precipitação ser igualado ou excedido, em um ano qualquer, tendo como base a série histórica de máximas anuais utilizada no cálculo. Define-se então o risco hidrológico como sendo a probabilidade de excedência de certo evento, estimada a partir da Distribuição de Gumbell, como mostrado nas Equações 4 e 5.

$$P = 1 - e^{-e^{-b}} \quad (4)$$

Onde:

$$b = \frac{1}{0,7797 \cdot s} \cdot (x - \bar{x} + 0,45 \cdot s) \quad (5)$$

Sendo

- x = valor a ser igualado ou excedido ;
- \bar{x} = média da série de dados;
- s = desvio padrão da série de dados.

3.3.3 – Precipitação máxima em função de tempo de retorno

É possível ainda calcular os valores de precipitação máxima, em função de um tempo já pré-determinado, representado na Equação 6. Com isso, é possível obter um valor máximo de chuva para um determinado tempo de retorno (Collischonn e Dornelles, 2015).

$$x = \bar{x} - s \cdot \left\{ 0,45 + 0,7797 \cdot \ln \left[\ln \left(\frac{TR}{TR-1} \right) \right] \right\} \quad (6)$$

3.4 – Planilha PMPCalc

Para este estudo, o cálculo da PMP, tempo de retorno e risco hidrológico serão realizados automaticamente pela planilha PMPCalc, desenvolvida no âmbito do projeto de iniciação científica PIBITI, para automatizar as rotinas de cálculo da PMP.

Desenvolvida pelos autores em linguagem Visual Basic (VBA), integrada ao Microsoft Excel, a planilha PMPCalc calcula a PMP para o fator de frequência “K” local e o fator de frequência “K” das envoltórias de Hershfield (1965). As envoltórias cadastradas no código do programa são correspondentes a 30 anos de dados, e por esse motivo, é necessário que as

estações pluviométricas tenham no mínimo, 30 anos de dados válidos para proceder com o cálculo.

- a) Utiliza-se séries históricas baixadas diretamente do site “Hidroweb”, da Agência Nacional de Águas (ANA), que permite realizar o download de séries históricas de estações pluviométricas.
- b) Baixa-se as séries históricas pluviométricas no formato .CSV (Excel);
- c) Das séries baixadas, utiliza-se apenas duas colunas: a coluna de data, e a coluna de máximas mensais;
- d) A planilha de cálculo da PMP possui 4 abas planilhas separadas de acordo com suas funções.
 - O manual do usuário, para eventual consulta acerca da metodologia, conforme Figura 8;

Figura 8 – Aba do manual do usuário da planilha PMPCalc



Fonte: Próprio autor, 2020

- A planilha de “ENTRADA DE DADOS”, com duas colunas disponíveis para o usuário colar as colunas extraídas da série histórica baixada, e botões para calcular ou limpar a planilha, como mostra a Figura 9.

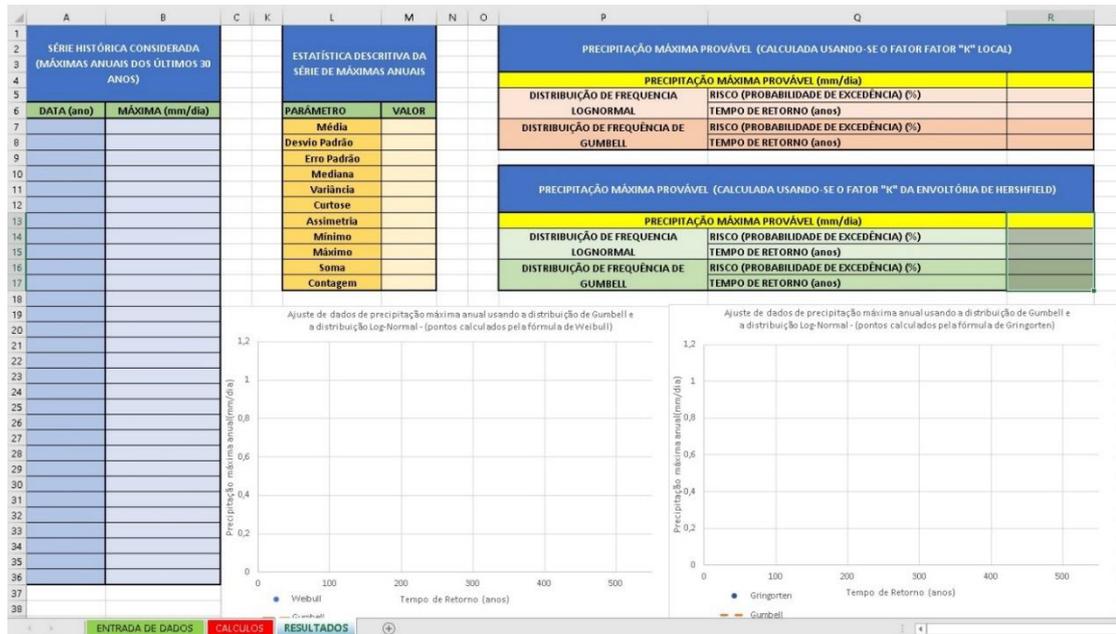
Figura 9 – Aba da entrada de dados da planilha PMPCalc

	A	B	C	D	L	U
1	PRECIPITAÇÃO	DATA	CHUVA			
2	MÁXIMA PROVÁVEL					
3						
4						
5	CALCULAR					
6						
7						
8						
9	●					
10						
11						
12						
13						
14	LIMPAR					
15						
16						
17	🗑️					
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						

Fonte: Próprio autor, 2020

- Há a planilha de “CALCULOS” que não deverá ser acessada ou modificada, pois ela garante o funcionamento do código,
- Por fim a planilha de “RESULTADOS”, que mostrará todos os resultados obtidos, conforme Figura 10.

Figura 10 – aba do Manual do Usuário da planilha PMPCalc



Fonte: Próprio autor, 2020

- e) A planilha irá selecionar os últimos 30 anos de dados. Se não houver essa quantidade mínima de anos válidos, a planilha acusará erro.
- f) Após o cálculo, a planilha mostrará:
 - Os 30 anos considerados da série e suas respectivas máximas diárias anuais,
 - A estatística descritiva do conjunto de dados;
 - O valor da PMP em “mm/dia”,
 - O risco hidrológico em “%”;
 - O tempo de retorno em “anos”,
- g) O risco hidrológico e tempo de retorno serão calculados tanto para a análise de fator “K” local ou fator “K” de Hershfield, considerando as distribuições Log-Normal e de Gumbell;
- h) A planilha traz também uma análise que permite o usuário escolher entre Log-Normal e Gumbell. Uma distribuição de probabilidade considerando 30 valores (correspondente aos 30 anos), considerando as proposições de Weibull e a proposição de Gringorten (SHAW et al, 2011, apud COLLISCHONN e DORNELLES, 2015).

3.5 – Elaboração de mapas pela interpolação do Inverso da Potência da Distância (IDW)

Para elaboração dos mapas utilizou-se a interpolação do Inverso da Potência da Distância (IDW), (NETO et al., 2018) descrita pela Equação 7.

$$X_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i}{d_i^m} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^m} \right)} \quad (7)$$

Onde:

- X_p : Variável interpolada na posição p;
- X_i : PMP conhecida nos pontos i, correspondentes as estações;
- d_i : distância euclidiana da estação i ao ponto p a ser estimado;
- m : expoente da distância euclidiana, base da potência;
- n : número de estações com dados de PMP consideradas no estudo;

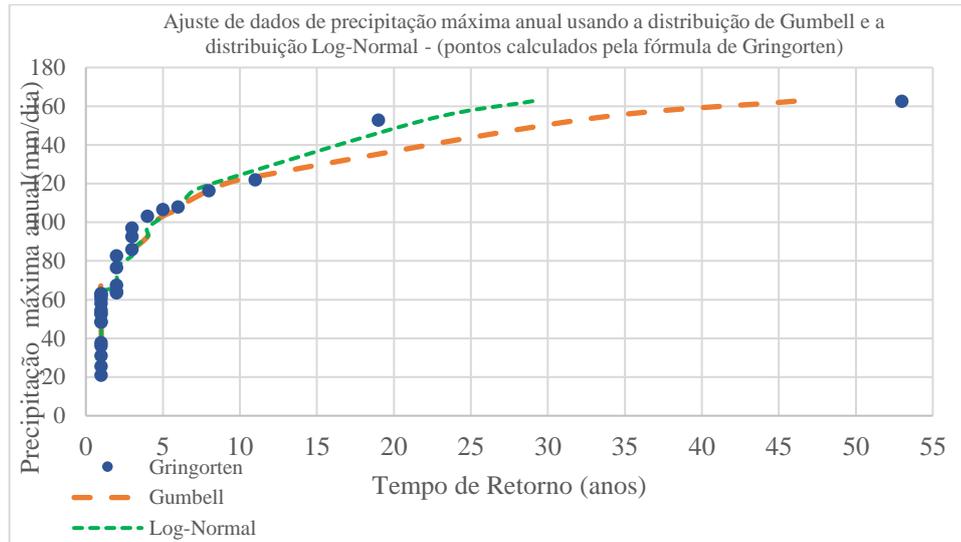
Utilizando o software ArcGis, no ambiente ArcMap, que possui a opção de IDW em suas ferramentas, gera-se uma nuvem de pontos com valores de precipitação ao longo da bacia, e dessa forma, é possível elaborar mapas com classes separadas de acordo com a intensidade dos valores, seja para precipitações ou para risco hidrológico.

Foi selecionado o expoente $m=2$ para a potência, pois como foi observado por Neto et al., (2018), ao analisar diferentes interpoladores, ($m=2, 3, 4$ e 5), o estudo concluiu que o melhor desempenho para a IDW foi o do valor $m=2$, justificado pelo fato que este apresentou o menor erro percentual absoluto.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para todos os cálculos realizados em todas as estações consideradas utilizando a planilha PMPCalc, a distribuição de Gumbel mostrou-se mais ajustada aos pontos da proposição de Gringorten, a exemplo do resultado obtido para estação 1140010 (Figura 11), e desse modo, foi selecionada como base de cálculo para o TR e risco hidrológico, conforme metodologia abordada pelas Equações 4, 5 e 6.

Figura 11 – Gráfico acerca do ajuste das distribuições de Gumbell e Log Normal, para a estação 1140010



Fonte: Próprio autor, 2020

Após os cálculos utilizando a planilha PMPCalc, para o fator de frequência “K” local foram obtidos os seguintes resultados, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4: Resultados para a PMP, TR e risco hidrológico, calculados a partir do fator de frequência “K” local.

Código	PMP (“K” local) (mm/dia)	Tempo de Retorno (anos)	Risco Hidrológico (%)
1140010	181	86	1,15
1139022	132	106	0,91
1140031	152	46	2,14
1241017	163	115	0,87
1240016	158	117	0,85
1239007	151	77	1,30
1241032	181	113	0,88
1241008	203	85	1,16
1241033	167	121	0,82
1241001	220	402	0,25
1240012	142	43	2,31

Fonte: Próprio autor, 2020

Considerando essa distribuição, é notável a existência de risco hidrológico muito alto, da ordem de 0,25% até 2,31 %, o que representa para o critério de dimensionamento de barragens, na maioria das vezes, como um risco inaceitável, no tocante ao uso dessas precipitações para cálculo de cheias.

Foi feita também a análise considerando o fator de frequência “K” da envoltória de Hershfield, conforme Tabela 5.

Tabela 5: Resultados para a PMP, TR e risco hidrológico, calculados a partir do fator de frequência “K” da envoltória de Hershfield.

Código	PMP (“K” Hershfield) (mm/dia)	Tempo de Retorno (anos)	Risco Hidrológico (%)
1140010	665	4.199.945.656	2,38 E-08
1139022	464	7.972.016.914	1,25 E-08
1140031	579	7.735.279.509	1,29 E-08
1241017	560	4.596.823.201	2,18 E-08
1240016	531	3.724.068.333	2,69 E-08
1239007	598	10.047.530.622	9,95 E-09
1241032	630	3.033.993.739	3,30 E-08
1241008	639	1.306.168.271	7,66 E-08
1241033	493	1.562.207.461	6,40 E-08
1241001	539	124.588.110	8,03 E-07
1240012	530	10.020.881.571	9,98 E-09

Fonte: Próprio autor, 2020

É possível observar que os resultados são mais conservadores, com valores maiores para a PMP, TRs maiores e um risco consideravelmente menor quando comparado aos resultados obtidos na Tabela 4. Entretanto, a utilização desses valores, a depender das características do barramento, poderia fazer com que esta estrutura fosse super dimensionada, causando problemas de viabilidade, custo e operação. Para tal, fez-se a análise também para os TR de 1000 e 10000 anos, que de acordo com a Equação 3, possuem Riscos Hidrológicos associados de respectivamente 0,1% e 0,01%. Os resultados encontrados são mostrados conforme Tabela 6.

Tabela 6: Resultados da PMP para os diferentes fatores de frequência “K” e a Precipitação Máxima em função dos tempos de retorno de 1000 e 10000 anos

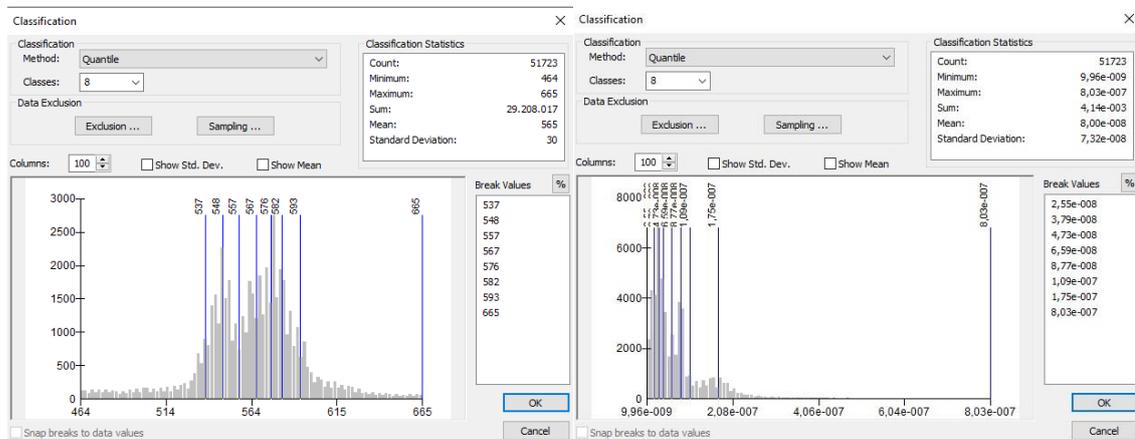
Código	PMP (“K” Local)	PM (TR 1000 anos)	PM (TR 10000 anos)	PMP (“K” Hershfield)
1140010	181	247	310	665
1139022	132	172	215	464
1140031	152	221	273	579
1241017	163	212	264	560
1240016	158	204	253	531
1239007	151	212	267	598
1241032	181	238	298	630
1241008	203	267	328	639
1241033	167	209	255	493
1241001	220	242	300	539
1240012	142	205	252	530

Fonte: Próprio autor, 2020

Fazendo o uso da Tabela 6 e da interpolação IDW (Interpolação pela Potência do Inverso da Distância), foi possível construir mapas com o comportamento das precipitações extremas na bacia do rio Paraguaçu. Foram elaborados mapas para as Precipitações Máximas para os TR de 1000 (Figura 13), TR de 10000 anos (Figura 14), e também para a PMP por Hershfield (Figura 15). Além disso, foi elaborado também o mapa para o risco hidrológico associado à PMP por Hershfield, para os valores calculados na Tabela 5, conforme Figura 16.

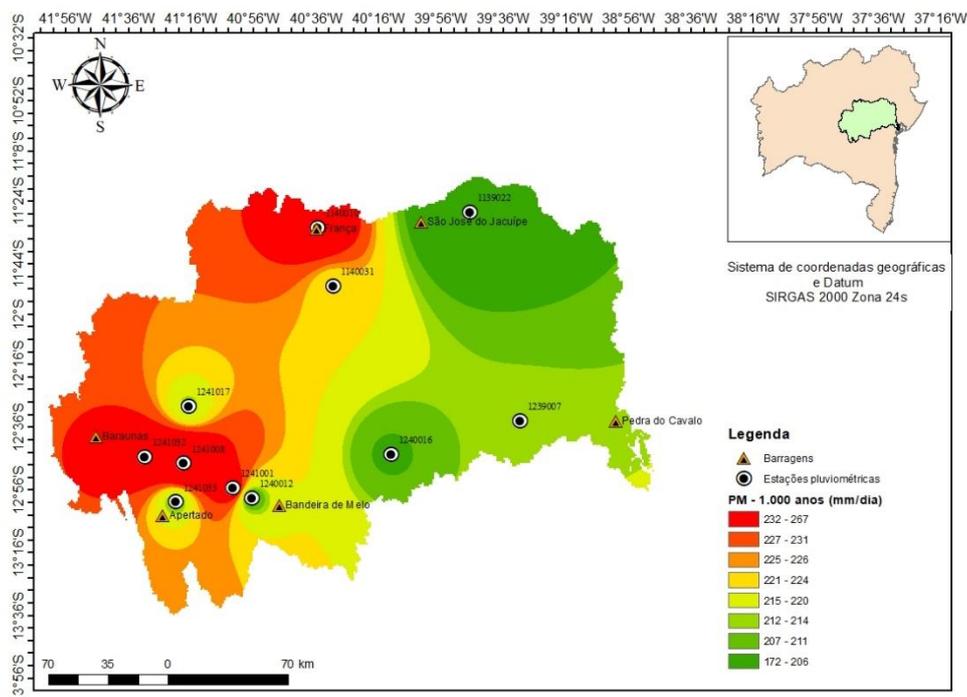
Para a separação das classes nos mapas, tanto para chuva quanto para risco hidrológico, optou-se por fazer a divisão de 8 classes, em função dos quantis. Ou seja, 8 classes de valores distribuídas em função de suas frequências ao longo do mapa, de modo que cada classe possua a mesma quantidade de ocorrências, conforme Figura 12.

Figura 12 – Divisão de classes com base nos quantis. Para os mapas da PMP de Hershfield (a esquerda) e risco hidrológico (a direita)



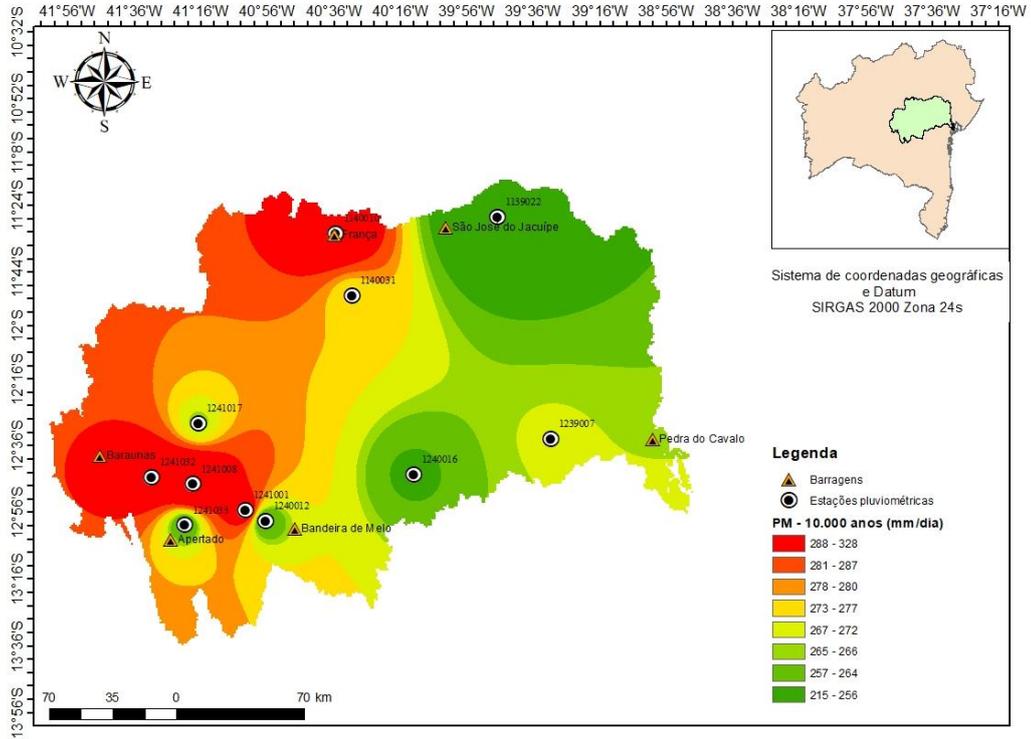
Fonte: Próprio autor, 2020

Figura 13 - Mapeamento da Precipitação Máxima para um TR de 1000 anos utilizando a IDW



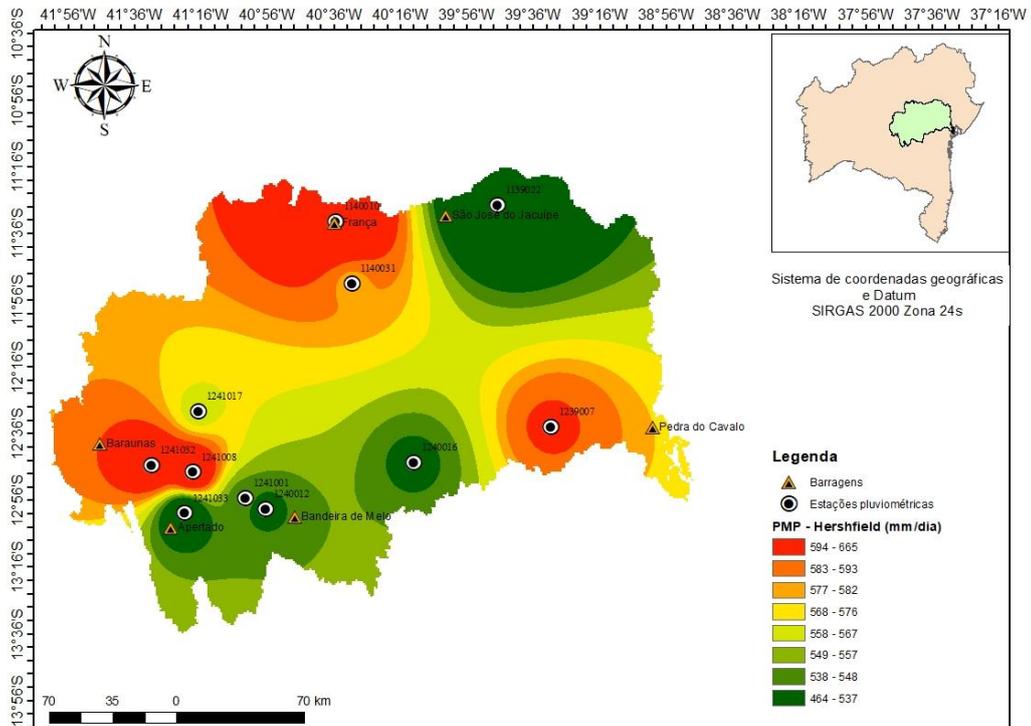
Fonte: Próprio autor, 2020

Figura 14 - Mapeamento da Precipitação Máxima para um TR de 10000 anos utilizando a IDW



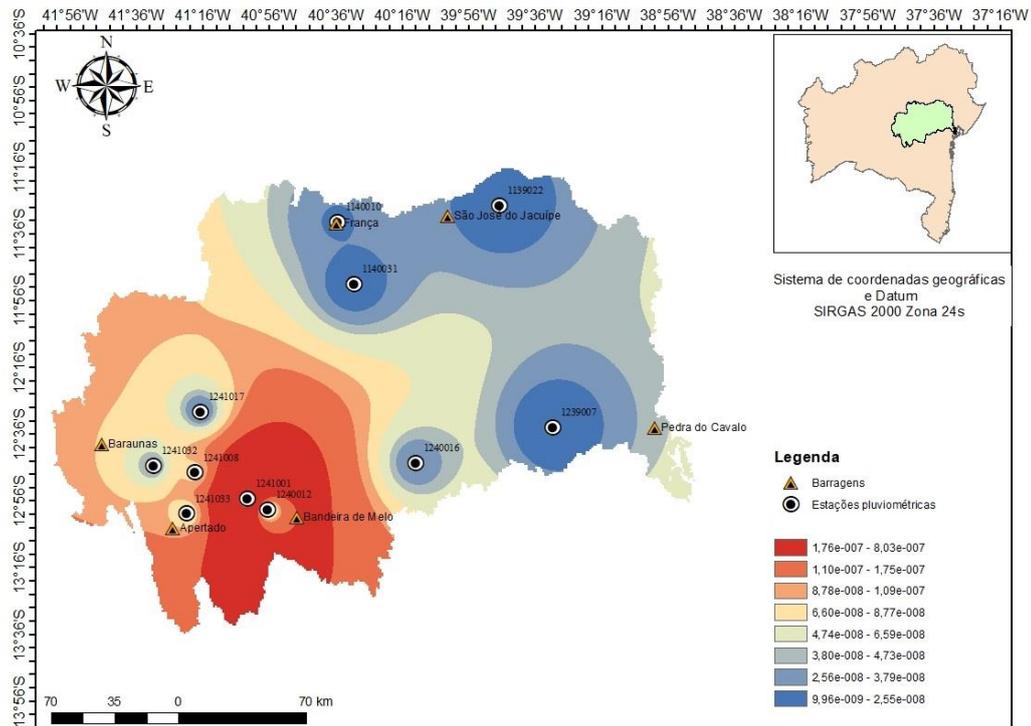
Fonte: Próprio autor, 2020

Figura 15 - Mapeamento da Precipitação Máxima Provável (Hershfield) utilizando a IDW



Fonte: Próprio autor, 2020

Figura 16 - Mapeamento do risco hidrológico associado a PMP (Hershfield), utilizando a IDW



Fonte: Próprio autor, 2020

Desse modo, foi possível, utilizando os mapas correspondentes a precipitação máxima para o TR de 1000 anos (Figura 13), e o mapa da PMP de Hershfield (Figura 15), além do mapa de risco hidrológico associado a PMP de Hershfield (Figura 16), estimar qual os valores de chuva a serem considerados como a precipitações extremas características da região de cada barramento, e o seu respectivo risco hidrológico, considerando as posições dos barramentos em relação as classes aos quais eles estão inseridos nos mapas. O valor adotado foi o maior valor da respectiva classe no qual o ponto da barragem está inserido, resultando na Tabela 7.

Tabela 7: Resultados para precipitações extremas e risco hidrológico para cada barramento.

Barragem	PM (mm/dia)	Risco Hidrológico (%)
Apertado	537	1,09 E-07
Bandeira de Melo	548	8,03 E-07
Baraúnas	665	8,77 E-08
França	267	0,10
Pedra do Cavalo	582	4,73 E-08
São José do Jacuípe	537	3,79 E-08

Fonte: Próprio autor, 2020

Os resultados obtidos mostram que, na região da barragem de França, possui o maior risco hidrológico, associado (0,1%) em função de um TR de 1000 anos, e possui também uma precipitação extrema de 267 mm/dia. Já para o restante das barragens, o maior risco associado foi de 8,03 E-07%, para a região da barragem de Bandeira de Melo, com uma PMP associada de 548 mm/dia.

Em linhas gerais, os riscos encontrados para a PMP calculada por Hershfield, possuem a mesma ordem de grandeza (1 E-09 a 1 E-07) quando comparado a estudos já realizados anteriormente, como os de Conceição (2019) e Santos (2019).

5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este estudo consistiu em uma maneira de investigar e mapear as precipitações extremas e risco hidrológico ao longo da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu. As inferências e os resultados foram obtidos a partir do cálculo das precipitações por metodologia estatística, e mapeamento usando a interpolação IDW.

O desenvolvimento da ferramenta PMPCalc permitiu também uma grande praticidade e economia de tempo para o cálculo da PMP, aliado ao fato de minimizar a ocorrência de erros, uma vez que a rotina de cálculo, quando feita manualmente poderá carregar erros para análise.

Entretanto, sabe-se que a determinação dos valores oriundos da espacialização, presentes na Tabela 7, representam uma alternativa para a falta de cobertura das estações pluviométricas, que além de escassas, muitas vezes não possuem anos suficientes para uma análise dentro dos parâmetros de 30 anos, recomendados pela WMO (2009). O adequado para uma análise mais precisa, seria a existência de mais estações pluviométricas ao longo da região, que iriam permitir um mapeamento mais fidedigno.

Dessa forma, a espacialização desses valores é uma forma de observar o comportamento dessas variáveis, com a utilização dos dados disponíveis. Recomenda-se uma análise semelhante, mas para os valores de cheias, que podem ser calculados a partir dos valores de precipitações obtidos nesse estudo, bem como a espacialização das cheias e comparação com as cheias de projeto de cada barramento.

Outra abordagem recomendada seria uma investigação de outros métodos de estimativa da PMP, como os métodos meteorológicos, que levem em consideração características físicas da bacia hidrográfica, com a finalidade de verificar a aderência do Hershfield para o Nordeste do país, bem como a possibilidade de calibrar ou corrigir esse modelo para a realidade presente.

6 – AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente a minha orientadora Andrea Fontes, pela atenção e comprometimento dedicados ao desenvolvimento desse estudo, e de outros ao longo da minha graduação. A minha companheira Inaúí Gonçalves, por estar sempre ao meu lado, em todas as horas, e por me incentivar tanto a alcançar meus objetivos. A minha família pelo suporte e apoio, e aos meus amigos, Leonardo, Kindelly e Thenisson, para os quais eu não tenho palavras para agradecer pela amizade, carinho e companheirismo.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. *Hidroweb. Sistema de informações hidrológicas*. Disponível em: < <http://hidroweb.ana.gov.br> >. Acessado em: 10 de 15/09/2020.
- [2] BURGER, Letícia Carlini. **Adaptação e análise do método de Hershfield para estimativa da Precipitação Máxima Provável (PMP)**. 2014. 100 p. Dissertação de Mestrado (Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba - PR, 2014.
- [3] CAVALCANTI, Rodrigo Luiz Costa; SILVA, Carlos Henrique dos Santos; DE JESUS, Elielma Santana; FILHO, Moacyr Cunha; STOŠIĆ, Tatijana. Estudo da precipitação máxima provável e tempo de retorno em Recife (PE). **III Congresso Internacional das Ciências Agrárias - COINTER - PDVAGRO**, [S. l.], p. 1-9, 8 dez. 2018.
- [4] Companhia de Engenharia Hídrica de de Saneamento da Bahia – CERB. Barragens – Construção, Operação e Manutenção. Disponível em < <http://www.cerb.ba.gov.br/atividades/barragens-construção-operação-e-manutenção>>, Acesso em 01/10/2020
- [5] COLLISCHONN, Walter; DORNELLES, Fernando. Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. **Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH**, v. 1, 2015.
- [6] CONCEIÇÃO, Murilo Pereira da Silva; **Risco hidrológico associado a precipitação máxima provável: Estudo de caso de 4 barragens da Bahia**. 2019; Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Cruz das Almas – BA. 2019
- [7] DE JESUS, Janisson Batista; NASCIMENTO, Yuri dos Santos. Tempo de retorno e espacialização das precipitações máximas pelo método dos momentos para o estado da Bahia. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 1, p. 127-131, 2020.
- [8] DO CARMO, José Simão Antunes. **Grandes barragens: vulnerabilidades e riscos**. Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Coimbra, 2013.

-
- [9] GONÇALVES, Mário Jorge de Souza. **Gestão quantitativa das águas superficiais da bacia hidrográfica do Rio Paraguaçu no estado da Bahia - Brasil**. 2014; Tese de Doutorado (Ciências - Geologia) – Universidade Federal da Bahia - UFBA. Salvador-BA. 2014
- [10] GUIMARÃES, Miguel Julio Machado; DA SILVA, Wellington Pereira; DA SILVA, Anderson Santos. Estudo das precipitações máximas para o município de Cruz das Almas, BA. **Magistra**, v. 27, n. 3/4, p. 316-322, 2017.
- [11] HERSHFELD, D. M. “*Method Estimating the probable maximum precipitation*”. Journal Am. Water Works Association. Vol.57, pg. 965-972, 1965
- [12] Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos – INEMA. Inventário de barragens. 2020. Disponível em: www.inema.ba.gov.br. Acessado em: 10/09/2020.
- [13] LADEIRA, Josias Eduardo Rossi; CORREA, Karolina Isabela; VILELA, Larissa Renata de Oliveira. Avaliação de risco em barragem de rejeitos de mineração: um estudo de caso. **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens - Comitê Brasileiro de Barragens**, [S. l.], ano V, n. 8, p. 10-16, 8 dez. 2019.
- [14] LAMAS, Ivana Reis; RITA, Luciana Santa; MIRANDA, Rogério Mucugê. **Semeando águas no Paraguaçu**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2016. Disponível em: <https://www.conservation.org/brasil/iniciativas-atuais/semendo-aguas-no-paraguacu>. Acesso em: 10 nov. 2020.
- [15] LIMA, Fernando Neves. **Avaliação das probabilidades de falhas em barragens, associadas a eventos de naturezas hidráulicas e hidrológicas: Estudo de caso da PCH Cajuru**. 2014; Dissertação de Mestrado (Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Belo Horizonte - MG. 2014
- [16] MAGALHÃES, Ivo Augusto Lopes; DE ALMEIDA, Keylla Lopes; THIAGO, Carlos Roberto Lima; JUNIOR, Benvindo Sirtoli Gardiman; ZANETTI, Sidney Sara; CECÍLIO, Roberto Avelino. Análise de métodos de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na região Norte do estado do Espírito Santo, Brasil. **XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Foz do Iguaçu, PR, p. 1-7, 13 abr. 2013.
- [17] MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (Brasília-DF). Agência Nacional de Águas - ANA. **Relatório de Segurança de Barragens - 2019**. [S. l.: s. n.], 2019. 69 p.
- [18] MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (Brasília-DF). Agência Nacional de Águas - ANA. **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens: Diretrizes para a Elaboração de Projetos de Barragens**. Brasília-DF: ANA, 2016. 160 p. v. V.
- [19] NETO, Virgílio Lourenço da Silva; BONFIM, Delfim Dias; PROLO, Tamara Thalia; ARAUJO, Pedro Henrique Haddad; DO CARMO, Ezequiel Lopes; JÚNIOR, Otacílio Silveira. Mapeamento da Precipitação Máxima Provável na bacia do rio Manuel Alves da Natividade. In: **9ª JICE-Jornada de Iniciação Científica e Extensão**. 2018.

-
- [20] OHARA, N.; KAVVAS, M.L; KURE, S.; CHEN, Z. Q.; JANG, S.; TAN, E.; Physically based estimation of maximum precipitation over American River watershed, California. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 16, n. 4, p. 351-361, 2011.
- [21] QUEIROZ, Aline Couto; ARAGÃO, Giani Aparecida Santana; SCHAPER, Débora do Vale. Critérios de Fechamento para Barragens: Panorama da Legislação Brasileira versus Diretrizes Internacionais. In: **XXXI Seminário Nacional de Grandes Barragens – SNGB**. Belo Horizonte - MG, 2017.
- [22] RODRIGUES, Mikael Timóteo; RODRIGUES, Bruno Timóteo; MALHEIROS, Jessica Moraes; DE AMORIM, Ricardo Ferreira Carlos; DA SILVA JR, Rosiberto Salustiano. O modelo atmosférico MM5 na simulação de precipitação nas bacias hidrográficas da área urbana de Maceió e a Zona da Mata de Alagoas. **GeoAtos - Revista Geografia em Atos**, Presidente Prudente - SP, v. 1, n. 15, p. 1-15, 2015.
- [23] SANTOS, Vanessa Carneiro dos; **Análise da aplicação de método estatístico para estimativa de cheia máxima provável**. 2019; Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Cruz das Almas – BA. 2019
- [24] WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation - PMP*. Geneva: 2009. 291 p.