

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ANÁLISE DO PARÂMETRO KM PARA O CÁLCULO DA PRECIPITAÇÃO MÁXIMA PROVÁVEL: ESTUDO DE CASO PARA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE

*Livia Assunção Taborda¹; Ana Carolina Canossa Becker²; Daniel Henrique Marco Detzel³&
Stella Braga de Andrade⁴*

Abstract: The Probable Maximum Precipitation (PMP), defined by the World Meteorological Organization as the greatest theoretically possible precipitation in a specific area and duration, can be estimated through hydrometeorological or statistical approaches, such as Hershfield's method, which applies the Km factor based on Ven Te Chow's frequency equation. However, this method, developed from USA data, may present limitations when applied in Brazil. This study evaluates the frequency factor Km for PMP estimation in the metropolitan region of Belo Horizonte, considering its relevance for mining dam safety under ANM Resolution No. 95/2022. The comparison between the results estimated using Hershfield's nomograph and the direct calculation of Km showed that the nomograph produces conservative, often overestimated values, while the Km calculated using the equation yielded results more consistent with regional conditions. Therefore, improving PMP estimation techniques, ensuring reliable historical data, and combining statistical and empirical methods are important aspects to be considered in the development of PMP estimates.

Resumo: A Precipitação Máxima Provável (PMP), definida pela Organização Meteorológica Mundial como a maior precipitação teoricamente possível em uma área e duração específicas, pode ser estimada por abordagens hidrometeorológicas ou estatísticas, como o método de Hershfield, que aplica o fator Km com base na equação de frequência de Ven Te Chow. No entanto, esse método, desenvolvido a partir de dados dos Estados Unidos, pode apresentar limitações para aplicações no Brasil. Este estudo avalia o fator de frequência Km para estimativa da PMP na região metropolitana de Belo Horizonte, considerando sua relevância para a segurança de barragens de mineração conforme a Resolução ANM nº 95/2022. A comparação entre os resultados estimados por meio do ábaco de Hershfield e o cálculo direto do Km apresentou que o ábaco produz valores conservadores, frequentemente superestimados, enquanto o Km calculado pela equação apresentou resultados mais consistentes com as condições regionais. Portanto, aprimorar as técnicas de estimativa da PMP, garantir dados históricos confiáveis e combinar métodos estatísticos e empíricos são importantes aspectos a serem considerados no desenvolvimento das estimativas da PMP.

Palavras-Chave – Segurança de barragens, RMBH, Precipitação Máxima Provável

1) UFPR/HIDROBR – liviataborda@ufpr.br/ livia.taborda@hidrobr.com

2) HIDROBR – ana.becker@hidrobr.com

3) UFPR – detzel@ufpr.br

4) HIDROBR – stella.andrade@hidrobr.com

INTRODUÇÃO

A Precipitação Máxima Provável (PMP) é caracterizada, conforme definição da Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2009), como a maior quantidade de chuva que pode ocorrer, teoricamente, sobre uma determinada área e durante um intervalo de tempo específico, considerando os limites físicos e meteorológicos. A estimativa da PMP pode ser realizada por duas abordagens principais: a hidrometeorológica, que consiste em intensificar a umidade presente na massa de ar responsável pelo evento chuvoso; e a estatística, proposta por Hershfield (1965), que se baseia na equação geral de frequência de Ven Te Chow, buscando chegar na PMP por meio da aplicação do fator Km. De acordo com Bertoni e Tucci (1993), diante das incertezas associadas à estimativa da PMP essa passou a ser considerada não como um limite físico absoluto, mas como um evento cuja probabilidade de ser excedido é extremamente baixa. E para Benson (1973), o método da Precipitação Máxima Provável tem sido amplamente utilizado e aceito ao longo do tempo, pois oferece uma solução para embasar decisões relacionadas ao nível de risco ou proteção adotado.

O método estatístico proposto por Hershfield pode apresentar limitações em sua aplicação no Brasil, uma vez que foi desenvolvido com base em dados e condições meteorológicas dos Estados Unidos. Diante disso, este estudo tem como finalidade avaliar o fator de recorrência Km para a estimativa da PMP com duração de 24 horas na região metropolitana de Belo Horizonte, em Minas Gerais, tendo em vista a grande concentração de empreendimentos minerários na região e a determinação da Resolução ANM nº 95/2022, ANM nº 130/2023 e ANM nº 175/2024 do uso da PMP para os dimensionamentos e avaliações da segurança de barragens de mineração.

MÉTODOS

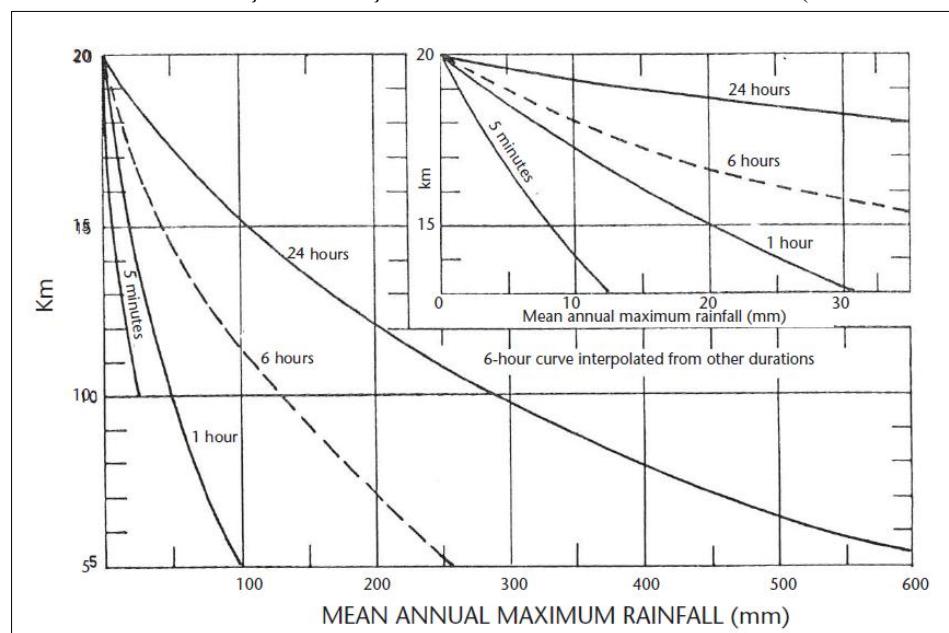
A estimativa da PMP pode ser realizada por meio de métodos estatísticos, especialmente quando existe uma série histórica consistente de dados pluviométricos disponíveis. Esse tipo de abordagem é particularmente indicado para regiões onde os registros meteorológicos são abrangentes e confiáveis. Conforme recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2009), o método estatístico mais amplamente aceito para essa finalidade é o desenvolvido por Hershfield, que utiliza a fórmula geral de frequência proposta por Ven Te Chow.

A equação utilizada para calcular a PMP é dada pela Equação 1, na qual X_{PMP} representa a precipitação máxima provável; \bar{x}_N é a média das chuvas máximas anuais; Km é o fator de recorrência/frequência e S_N é o desvio padrão correspondente.

$$X_{PMP} = \bar{x}_N + Km \cdot S_N \quad (1)$$

No estudo original de Hershfield (1961), o fator Km foi determinado para 2.645 estações pluviométricas, a maioria localizadas nos Estados Unidos, e apresentou um valor máximo de 15 para precipitações com duração de 24 horas. Hershfield apontou que os valores de Km variavam inversamente com a magnitude das médias das chuvas máximas anuais. Assim, ele elaborou um ábaco com valores ajustados de Km que consideravam diferentes durações e apresentavam valores máximos próximos a 20 apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Ábaco Km em função da duração da chuva e da média da série anual. (Fonte: WMO, 2009).



Além disso, Hershfield propôs uma fórmula específica para o cálculo individualizado de Km para cada estação, expressa pela Equação 2, na qual Km é o fator de recorrência/frequência; X_{max} é o maior valor observado na série; \bar{X}_{n-1} é a média da série sem o valor máximo; S_{n-1} é o desvio padrão sem o valor máximo.

$$Km = \frac{X_{max} - \bar{X}_{n-1}}{S_{n-1}} \quad (2)$$

Diante disso, optou-se por utilizar tanto o ábaco de Hershfield quanto o cálculo direto dos fatores de recorrência propostos pelo autor apresentado na Equação (2), com o intuito de promover uma análise comparativa entre os resultados.

Área de Estudo

A área de estudo para a análise das precipitações máximas prováveis de 24 horas é a região metropolitana de Belo Horizonte, que segundo a lei complementar Nº 89/2006 de 12/01/2006, é composta por 34 municípios.

A Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), situada no estado de Minas Gerais concentra uma das maiores densidades populacionais do Brasil, além de atividade econômica e industrial. A área apresenta um relevo predominantemente montanhoso, o que influencia os padrões de escoamento superficial e intensifica os impactos de eventos pluviométricos extremos. A RMBH também abriga diversas estruturas hidráulicas, incluindo barragens de abastecimento, controle de cheias, e rejeitos da mineração — atividade de grande importância econômica na região. Nesse contexto, a estimativa precisa da PMP torna-se essencial para o dimensionamento seguro de barragens, conforme determinado pela Resolução ANM nº 95/, contribuindo para a prevenção de desastres e para a adaptação da infraestrutura frente à variabilidade meteorológica.

Foram selecionadas as estações pluviométricas dentro dos 34 municípios que contemplam a RMBH. Foram analisadas e selecionadas as estações que apresentaram pelo menos 20 anos de dados

e foram excluídos os anos hidrológicos que apresentavam mais de 20% de dias de falha no ano ou 10% de dias de falhas no período chuvoso (outubro a março). Os dados pluviométricos desse estudo foram obtidos através da plataforma HIDROWEB (ANA, 2025) e o total de 30 estações selecionadas após análises dos dados estão apresentadas na Figura 2 e Tabela 1.

Figura 2 - Estações pluviométricas selecionadas dentro da RMBH.

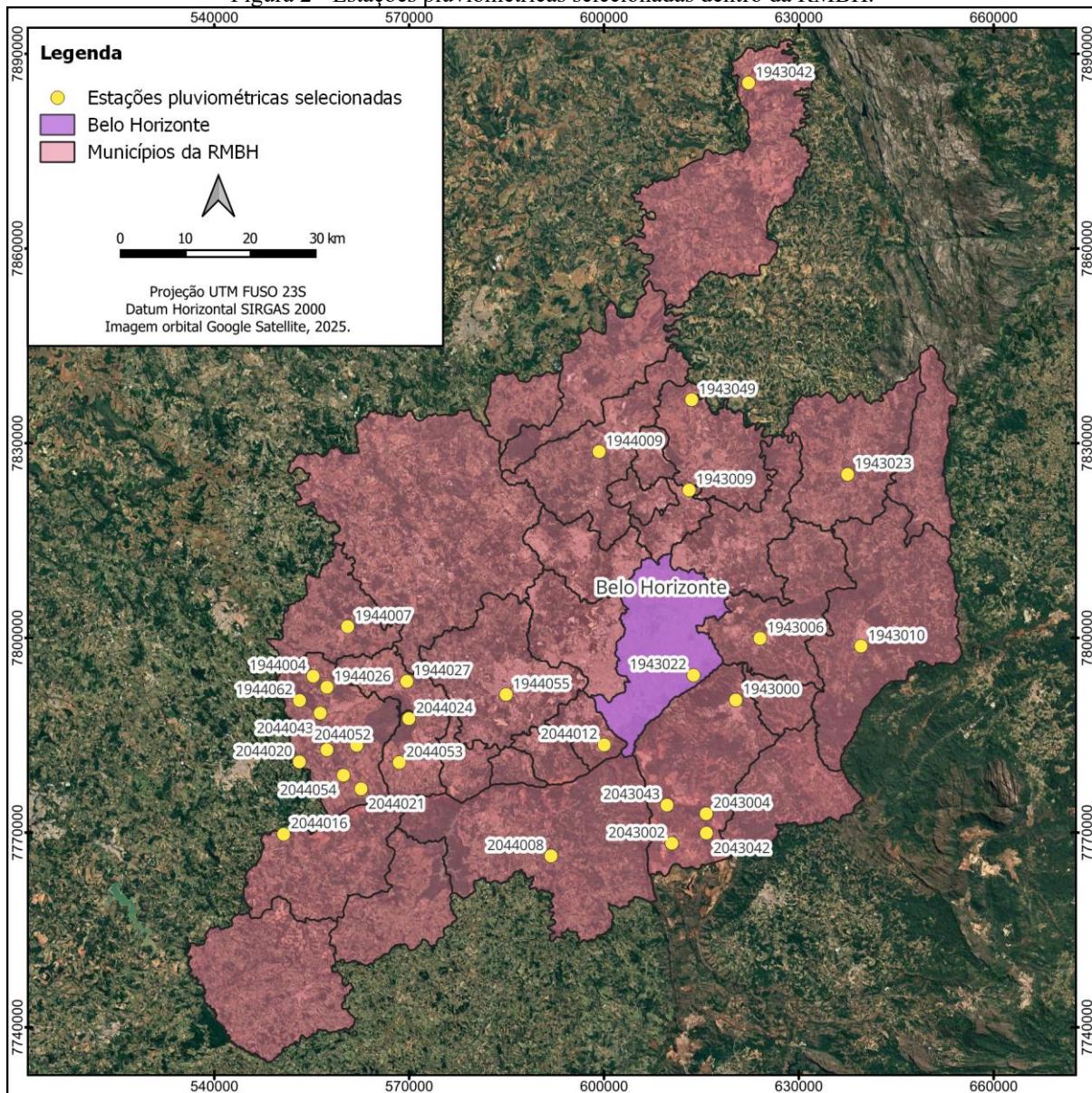


Tabela 1 – Estações pluviométricas selecionadas.

| Estação | Latitude | Longitude | Número de anos sem falhas | Estação | Latitude | Longitude | Período de dados |
|---------|----------|-----------|---------------------------|---------|----------|-----------|------------------|
| 1943000 | -19,9792 | -43,8500 | 59 | 2043002 | -20,1792 | -43,9428 | 57 |
| 1943006 | -19,8931 | -43,8150 | 59 | 2043004 | -20,1378 | -43,8925 | 61 |
| 1943009 | -19,6872 | -43,9208 | 66 | 2043042 | -20,1647 | -43,8919 | 44 |
| 1943010 | -19,9028 | -43,6664 | 72 | 2043043 | -20,1261 | -43,9503 | 40 |

| Estação | Latitude | Longitude | Número de anos sem falhas | Estação | Latitude | Longitude | Período de dados |
|---------|----------|-----------|---------------------------|---------|----------|-----------|------------------|
| 1943022 | -19,9450 | -43,9125 | 50 | 2044008 | -20,1978 | -44,1208 | 62 |
| 1943023 | -19,6639 | -43,6881 | 74 | 2044012 | -20,0428 | -44,0433 | 57 |
| 1943042 | -19,1197 | -43,8375 | 35 | 2044016 | -20,1692 | -44,5150 | 45 |
| 1943049 | -19,5614 | -43,9178 | 31 | 2044019 | -20,0514 | -44,4517 | 52 |
| 1944004 | -19,9489 | -44,4722 | 79 | 2044020 | -20,0683 | -44,4922 | 45 |
| 1944007 | -19,8797 | -44,4217 | 68 | 2044021 | -20,1056 | -44,4011 | 43 |
| 1944009 | -19,6344 | -44,0533 | 60 | 2044024 | -20,0075 | -44,3311 | 47 |
| 1944026 | -19,9642 | -44,4519 | 50 | 2044043 | -20,0003 | -44,4617 | 39 |
| 1944027 | -19,9556 | -44,3344 | 50 | 2044052 | -20,0450 | -44,4078 | 41 |
| 1944055 | -19,9733 | -44,1881 | 31 | 2044053 | -20,0686 | -44,3450 | 35 |
| 1944062 | -19,9828 | -44,4922 | 28 | 2044054 | -20,0867 | -44,4272 | 35 |

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2 apresenta a relação entre os valores do fator de recorrência (Km) obtido pela equação proposta por Hershfield e pelos valores de Km obtido pelo ábaco (Figura 1) para as estações selecionadas, bem como a porcentagem que indica o quanto o valor do ábaco é maior em relação ao da equação.

Observa-se na Tabela 2 que o menor valor de Km encontrado pela equação é 2,29 (estação pluviométrica 19430000), enquanto pelo ábaco é 15,09 (estação 1943022). A maioria dos valores de Km pelo ábaco estão compreendidos entre 2,5 e 5,0, com um valor destoante de 11,98 na estação 1944062. Já os valores de Km do ábaco são consistentemente altos e variam muito pouco, sugerindo uma padronização ou imprecisão generalizada. A maioria das porcentagens está entre 200% e 500%, indicando que os valores de Km do ábaco são, em média, mais de 3 vezes maiores do que os obtidos pela equação.

Tabela 2 - Relação de porcentagem do fator de recorrência (Km).

| Estação | Km Equação | Km Ábaco | % do km do ábaco em relação ao km obtido pela equação | Estação | Km Equação | Km Ábaco | % do km do ábaco em relação ao km obtido pela equação |
|---------|------------|----------|---|---------|------------|----------|---|
| 1943000 | 2,29 | 15,51 | 576% | 2043002 | 4,40 | 15,63 | 255% |
| 1943006 | 2,65 | 15,45 | 484% | 2043004 | 4,91 | 15,36 | 213% |
| 1943009 | 6,41 | 15,93 | 148% | 2043042 | 3,70 | 15,51 | 319% |
| 1943010 | 4,85 | 15,50 | 220% | 2043043 | 2,71 | 15,41 | 469% |
| 1943022 | 3,65 | 15,09 | 313% | 2044008 | 4,15 | 15,97 | 285% |
| 1943023 | 2,73 | 15,74 | 476% | 2044012 | 3,94 | 15,42 | 292% |
| 1943042 | 4,38 | 15,77 | 260% | 2044016 | 2,76 | 15,84 | 474% |
| 1943049 | 4,60 | 16,21 | 253% | 2044019 | 3,66 | 15,94 | 335% |
| 1944004 | 3,51 | 15,79 | 350% | 2044020 | 2,79 | 15,89 | 470% |
| 1944007 | 3,14 | 15,71 | 400% | 2044021 | 3,17 | 15,67 | 394% |
| 1944009 | 2,78 | 15,95 | 475% | 2044024 | 3,90 | 15,60 | 300% |
| 1944026 | 3,51 | 15,64 | 346% | 2044043 | 4,56 | 15,35 | 237% |
| 1944027 | 2,36 | 15,54 | 558% | 2044052 | 5,27 | 15,82 | 200% |
| 1944055 | 3,44 | 15,83 | 360% | 2044053 | 2,71 | 15,56 | 473% |
| 1944062 | 11,98 | 15,59 | 30% | 2044054 | 4,44 | 15,91 | 258% |

Por sua vez, a Tabela 3 apresenta a relação de porcentagem da PMP com duração de 24 horas em função do Km calculado através da equação e adotado pelo ábaco. Para a transformação do dado de duração 1 dia para 24 horas, foi aplicado o fator de 1,14.

Observa-se na Tabela 3 que em todas as estações, o método do ábaco superestima os valores da PMP em relação à equação. A média da PMP pelo ábaco foi de aproximadamente 480,7 mm, enquanto pela equação foi de 185,7 mm, uma diferença média de 67%. A maioria das porcentagens de diferença ficou entre 120% e 230%, indicando que o ábaco tende a fornecer valores até mais que o dobro dos obtidos pela equação.

Os resultados apontaram que o método do ábaco de Hershfield gerou estimativas mais elevadas de PMP, alinhadas a uma abordagem conservadora, enquanto os valores obtidos pelos Km da equação foram relativamente mais baixos, refletindo diferenças metodológicas entre as abordagens.

Conforme indicado pela Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2009), uma das principais limitações da abordagem estatística para o cálculo da PMP é a definição precisa do fator Km, o qual é uma variável estatística dependente dos registros históricos de precipitação. A técnica de Hershfield sugere que as médias e os desvios padrão da amostra devem ser ajustados, levando em conta a influência de valores extremos presentes nas séries históricas. Fernando e Wickramasuriya (2021) apontam uma limitação importante na suposição adotada por Hershfield, ao considerar que o maior valor de precipitação registrado representa, isoladamente, um ponto atípico. Tal abordagem é questionável, uma vez que, em séries históricas, é possível a ocorrência de múltiplos eventos extremos ou, em alguns casos, a ausência deles. Essa generalização pode comprometer a representatividade estatística da análise, especialmente em contextos em que a variabilidade dos dados é elevada.

Tabela 3 -Relação de porcentagem da PMP obtida utilizando o Km da equação e do ábaco.

| Estação | PMP (Km Equação) | PMP (Km Ábaco) | % da PMP (Km ábaco) em relação à PMP (Km equação) | Estação | PMP (Km Equação) | PMP (Km Ábaco) | % da PMP (Km ábaco) em relação à PMP (Km equação) |
|---------|------------------------|----------------------|---|---------|------------------------|----------------------|--|
| 1943000 | 149,66 | 493,91 | 230% | 2043002 | 213,87 | 537,99 | 152% |
| 1943006 | 164,91 | 520,35 | 216% | 2043004 | 234,80 | 534,84 | 128% |
| 1943009 | 220,89 | 430,75 | 95% | 2043042 | 203,11 | 563,81 | 178% |
| 1943010 | 218,71 | 501,31 | 129% | 2043043 | 171,48 | 541,27 | 216% |
| 1943022 | 230,43 | 636,17 | 176% | 2044008 | 151,71 | 359,88 | 137% |
| 1943023 | 154,72 | 490,04 | 217% | 2044012 | 217,01 | 580,58 | 168% |
| 1943042 | 211,94 | 546,32 | 158% | 2044016 | 136,82 | 397,12 | 190% |
| 1943049 | 176,35 | 437,55 | 148% | 2044019 | 157,86 | 420,55 | 166% |
| 1944004 | 164,22 | 448,36 | 173% | 2044020 | 134,48 | 387,56 | 188% |
| 1944007 | 172,48 | 522,49 | 203% | 2044021 | 150,15 | 402,98 | 168% |
| 1944009 | 140,11 | 430,01 | 207% | 2044024 | 168,04 | 409,34 | 144% |
| 1944026 | 174,63 | 478,73 | 174% | 2044043 | 201,16 | 454,88 | 126% |
| 1944027 | 147,24 | 470,56 | 220% | 2044052 | 201,25 | 439,35 | 118% |
| 1944055 | 159,17 | 436,65 | 174% | 2044053 | 162,31 | 509,86 | 214% |
| 1944062 | 466,51 | 580,61 | 24% | 2044054 | 151,92 | 337,17 | 122% |

CONCLUSÕES

A análise comparativa das metodologias para estimativa da Precipitação Máxima Provável – PMP e do parâmetro Km evidencia importantes implicações para projetos de engenharia. O uso do método do ábaco de Hershfield apresentou-se mais conservador, resultando em estimativas mais elevadas de PMP, o que pode influenciar no dimensionamento de estruturas, com possíveis implicações sobre o uso de recursos. Os resultados de PMP obtidos utilizando os parâmetros *Km* determinados pela equação, por outro lado, apresentaram maior variabilidade, configurando-se como uma alternativa mais compatível com a realidade regional e eficiente para a base dos projetos.

Dessa forma, fica clara a importância de aprimorar as técnicas de estimativa da PMP, adaptando-as às particularidades de cada região do Brasil. Além disso, é fundamental considerar a representatividade e a qualidade das séries históricas de precipitação ao aplicar essas metodologias, visto que dados inconsistentes ou curtos podem comprometer significativamente a confiabilidade dos resultados.

Recomenda-se que estudos futuros considerem o uso combinado de diferentes abordagens estatísticas e empíricas, com a aplicação de critérios técnicos bem definidos para escolha dos métodos mais adequados conforme a realidade hidrológica de cada bacia. A adoção de práticas mais criteriosas na definição da PMP é essencial para garantir a padronização ao atendimento de critérios de segurança hídrica e estrutural, bem como a otimização de custos nos empreendimentos de infraestrutura.

Por fim, apesar dos resultados apresentados, é importante destacar algumas limitações do estudo. As estimativas de PMP obtidas, tanto pelo método do ábaco quanto pela equação do índice Km, estão sujeitas à qualidade e representatividade das séries históricas utilizadas. Além disso, como

a PMP é uma estimativa teórica de um evento extremo, não há um valor observável que permita a verificação direta dos resultados, dessa forma torna a validação direta dos métodos inviável, restringindo as análises à comparação relativa entre abordagens. Tais limitações devem ser consideradas ao aplicar os resultados ao dimensionamento de estruturas hidráulicas.

REFERÊNCIAS

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. HIDROWEB. Disponível em: <https://www.ssnirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: jun/2025.

BENSON, M. A. Storms, floods, and debris flows: How can we avoid the hazards? In: Proceedings of the 43rd Western Snow Conference, 1973.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. (org.). Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 1993.

BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. Resolução ANM nº 95, de 07 de fevereiro de 2022. (2022). Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, Edição 33, seção 1, p. 49, 16 fev.

FERNANDO, W. C. D. K, WICKRAMASURIYA, S. S. *Concept of Threshold in the Estimation of Probable Maximum Precipitation: Hershfield's Method Revisited*. ASCE. 2021.

GOVERNO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. *Lei Complementar nº 89, de 12 de janeiro de 2006*. Dispõe sobre a Região Metropolitana de Belo Horizonte. Belo Horizonte, 2006.

HERSHFIELD, D. M. *Estimating the probable maximum precipitation*. In: Journal of Hydraulics. Division. American Society of Civil Engineers., v. 87, n.5, New York Set., p.99-116, 1961.

HERSHFIELD, D. M. *Method for estimating probable maximum rainfall*. In: Journal of the American Water Works Association., v. 57, n.8, New York, Ago., p.65-72, 1965.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation - PMP*. Geneva, 2009.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à HIDROBR pelo apoio na publicação.