GESTÃO DINÂMICA DE RISCO HIDROLÓGICO DURANTE OBRAS DE ADEQUAÇÃO DE EXTRAVASORES EM BARRAGENS DE MINERAÇÃO

Luisa de Moura LEÃO
Engenheira Civil Geotécnica, DSc. em Geotecnia
3EM Mineração e Geologia

Marta Sawaya MIRANDA
Engenheira Geóloga, MSc. em Engenharia de Barragens
3EM Mineração e Geologia

Bruno Manassés Alves BATISTA
Engenheiro de Minas, Esp. em Engenharia de Barragens de Rejeito
3EM Mineração e Geologia

Marconi Bicalho CESCO
Engenheiro de Minas, Esp. em Engenharia Geotécnica
3EM Mineração e Geologia

Letícia Thomaz de Souza VIEIRA
Graduanda em Engenharia de Minas
Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO

A execução de obras em extravasores de barragens durante a estação chuvosa apresenta elevada complexidade e risco hidrológico, especialmente em regiões tropicais. Este estudo propõe uma abordagem de gestão dinâmica de risco aplicada à adequação do canal extravasor de uma barragem de rejeitos em Minas Gerais, permitindo a continuidade das atividades com segurança. A metodologia integra simulações de trânsito de cheias com critérios operacionais de campo, considerando níveis do reservatório entre 517 e 524 m, chuvas de 6 a 24 horas e tempos de retorno de 500 a 10.000 anos. A partir disso, foram definidos Níveis de Controle Operacional (NCO) baseados na taxa de elevação do nível d'água e no tempo até o início do vertimento. O Plano de Contingência incluiu desvio provisório, bombeamento auxiliar, monitoramento em tempo real e TARP, alinhado à Resolução ANM nº 95/2022. Os tempos até vertimento variaram de cerca de 12 a 2 horas, garantindo margem para interrupção e evacuação. Os resultados indicam que a conversão de modelagens hidrológicas em parâmetros operacionais objetivos é eficaz para gestão de risco, aumentando a resiliência e a segurança em períodos chuvosos.

ABSTRACT

Construction activities on dam spillways during the rainy season involve high operational complexity and significant hydrological risk, particularly in tropical regions. This study proposes a dynamic risk management approach applied to the upgrading of a tailings dam spillway channel in Minas Gerais, enabling safe continuity of works. The methodology integrates flood routing simulations with field-applicable operational criteria, considering reservoir levels between 517 and 524 m, rainfall durations of 6 to 24 hours, and return periods from 500 to 10,000 years. Based on these scenarios, dynamic Operational Control Levels (OCLs) were defined according to the rate of water level rise and the time to overtopping. The Contingency Plan included a temporary diversion channel, auxiliary pumping, real-time monitoring, and a Trigger Action Response Plan (TARP), aligned with ANM Resolution No. 95/2022. Estimated times to overtopping ranged from approximately 12 to 2 hours, ensuring sufficient margin for safe interruption and evacuation. The results indicate that translating hydrological modeling into objective operational parameters is effective for risk management, enhancing resilience and safety during wet-season operations.

1. INTRODUÇÃO

A execução de obras em estruturas críticas de barragens durante a estação chuvosa é um dos principais desafios da mineração contemporânea. O aumento na frequência e intensidade de cheias extremas, aliado às projeções de agravamento climático, exige revisão das práticas de projeto e operação de estruturas hidráulicas e de contenção de rejeitos [1, 2].

Este artigo apresenta uma metodologia aplicada a uma barragem de rejeitos com intervenções no extravasor durante o período chuvoso, demandando um plano robusto de contingência e evacuação. A literatura mostra que métodos determinísticos não capturam plenamente as incertezas em estruturas alteadas, recomendando abordagens probabilísticas e baseadas em confiabilidade [3, 4].

A proposta vai além da Resolução ANM nº 95/2022 [5], ao converter simulações hidrológicas complexas em limites operacionais simples e acionáveis em tempo real. A integração entre previsões meteorológicas, modelagem hidrológica e ferramentas de suporte à decisão permite antecipar eventos críticos, reduzir inundações a jusante e garantir operação segura.

Por fim, a eficácia da gestão de risco de inundação depende da integração entre modelos hidrológicos e hidráulicos, monitoramento contínuo e protocolos de resposta, assegurando a continuidade segura das obras mesmo sob alta incerteza climática [6, 7]. Para isso, o presente artigo apresenta uma metodologia baseada em Níveis de Controle Operacional ($NCOs$) que traduzem simulações hidrológicas em decisões de campo objetivas, estruturadas em quatro níveis de ação.

1.1 Contexto Técnico e Regulatório

Vertedores e canais extravasores são elementos fundamentais em sistemas hidráulicos, sendo amplamente empregados tanto para a medição de vazão em canais abertos quanto para o controle seguro de níveis d'água em reservatórios [8]. No contexto da mineração, esses dispositivos assumem papel ainda mais crítico, uma vez que barragens de rejeitos são estruturas de contenção destinadas ao armazenamento de materiais sem valor econômico provenientes dos processos de beneficiamento mineral, exigindo elevados padrões de segurança hidráulica e operacional [9].

Paralelamente, os avanços recentes nos sistemas de previsão e alerta aplicados à gestão de recursos hídricos e à operação de sistemas de drenagem têm ampliado a capacidade de antecipação e resposta a eventos hidrológicos extremos, contribuindo para a redução de riscos associados a cheias e sobrecargas hidráulicas [10].

A barragem estudada é uma estrutura de contenção de rejeitos localizada em Minas Gerais, com reservatório operando entre as cotas 517 e 524 m. A estrutura é dotada de um canal extravasor de soleira livre, cujo projeto original atendia às vazões de referência, mas apresentava velocidades de escoamento superiores aos limites recomendados pelas boas práticas internacionais [8, 11]. Diante disso, foi elaborado um novo Projeto Executivo, validado quanto à segurança hidráulica e geotécnica.

Contudo, sua implantação coincidirá com o período chuvoso, conforme série histórica de precipitação local (1993–2022). Foi exigido pelo órgão regulamentador, a elaboração de um Plano de Contingência para:

- Definir as precipitações críticas capazes de atingir a cota da soleira;
- Estabelecer limites de controle do nível do reservatório; e
- Integrar um Plano de Ação por Gatilhos (TARP) ao sistema de bombeamento existente.

Este artigo responde diretamente a essas exigências, propondo uma estrutura de gestão de risco operacional alinhada às melhores práticas internacionais e adaptada às condições locais.

1.2 Justificativa, Objetivo e Inovação Operacional

Embora o vertimento seja uma condição operacional prevista em barragens, a execução de obras no extravasor introduz um risco adicional não contemplado pelos planos tradicionais de emergência, especialmente pela exposição direta de trabalhadores. Apesar da baixa recorrência histórica de eventos de vertimento no caso estudado, a crescente não estacionariedade hidrológica, associada às mudanças climáticas, impõe maior incerteza e potencial intensificação de eventos extremos.

A principal inovação do trabalho reside na conversão de dados hidrológicos complexos em decisões operacionais objetivas (continuar, restringir ou evacuar). A partir de simulações no HEC-HMS, correlacionaram-se tempos até o vertimento com taxas de elevação do nível d'água, adotando margens de segurança conservadoras. Isso permitiu estabelecer Níveis de Controle Operacional (NCO) dinâmicos, de fácil interpretação e aplicação em campo, sem necessidade de análise técnica especializada em tempo real.

O estudo propõe, portanto, uma metodologia replicável de gestão dinâmica do risco hidrológico em obras de extravasores de barragens de mineração, estruturada em níveis de alerta, tempos de resposta e protocolos de evacuação. Tal abordagem contribui para o aprimoramento das práticas de segurança operacional e para a adaptação a cenários hidrológicos mais incertos e extremos.

2. GESTÃO DINÂMICA DE RISCO HIDROLÓGICO

A metodologia proposta visa garantir a segurança operacional durante obras no sistema extravasor de uma barragem de mineração realizadas parcialmente na estação chuvosa. A abordagem integra modelagem hidrológica, análise da resposta dinâmica do reservatório e protocolos de ação escalonada, convertendo cenários complexos em limites operacionais claros e aplicáveis em campo.

O estudo hidrológico-hidráulico de referência forneceu os parâmetros básicos, área da bacia, tempo de concentração, curvas IDF e série pluviométrica (1979-2022),

permitindo definir precipitações críticas para tempos de retorno de 500, 1.000 e 10.000 anos e durações de 6 a 24 horas.

2.1 Simulações do Trânsito de Cheias

As simulações foram realizadas no software HEC-HMS 4.12, modelando o reservatório como um nó único de armazenamento e utilizando a curva cota-descarga do extravasor (El. 525,00 m). Foram executadas 96 simulações, combinando 8 níveis iniciais de reservatório (El. 517 a 524 m), 4 durações de chuva (6, 8, 10 e 24 h) e 3 tempos de retorno (500, 1.000 e 10.000 anos), conforme esquematizado na Figura 1.

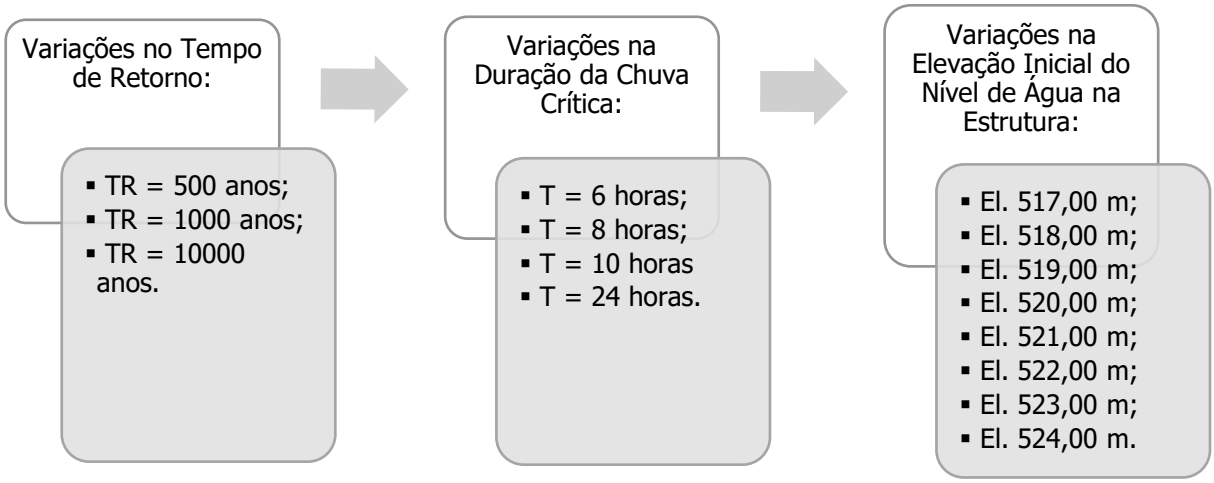


Figura 1 – Combinações simuladas no HEC-HMS

Os resultados permitiram estimar o tempo mínimo até o vertimento e a taxa de elevação do nível d'água (dH/dt), para cenários mais críticos (TR = 10.000 anos).

2.2 Nível de Controle Operacional (NCO)

O Nível de Controle Operacional (NCO) é definido a partir de uma matriz de decisão baseada em dois parâmetros críticos:

- Margem de Segurança Operacional (M_{seg}): tempo até o início do vertimento; e
- Taxa de Elevação do Reservatório (Tx_{elev}): variação da cota do nível d'água em metros por hora.

A Margem de Segurança Operacional foi definida como a diferença entre o tempo até o início do vertimento e o tempo necessário para uma evacuação segura, conforme a Equação (1), em que T_{vert} é o tempo mínimo para o início do vertimento, e T_{evac} é o tempo necessário para evacuação segura.

$$M_{seg} = T_{vert} - T_{evac} \quad (1)$$

Esse parâmetro representa o tempo efetivamente disponível para a manutenção ou interrupção segura das atividades, sendo o principal indicador temporal para a tomada de decisão operacional.

A Taxa de Elevação do Nível d'água foi estimada a partir da relação direta entre a variação da cota do reservatório e o intervalo de tempo necessário para atingir a soleira do extravasor, conforme a Equação (2).

Os valores de Tx_{elev} utilizados na classificação dos $NCOs$ foram obtidos a partir das simulações hidrológicas para cenários críticos no Hec – HMS, em que Hf é a elevação da soleira do extravasor, Hi é a elevação inicial do reservatório, Tf é o instante estimado para início do vertimento e Ti é o instante inicial da simulação.

$$Tx_{elev}\ (m/h) = \frac{Hf - Hi}{Tf - Ti} \qquad (2)$$

A classificação do NCO adota uma lógica conservadora, em que o critério mais crítico prevalece. Os quatro níveis (1-Normal, 2-Atenção, 3-Alerta e 4-Evacuação) definem limites quantitativos de M_{seg} e Tx_{elev}, além de ações correspondentes de monitoramento, comunicação e evacuação (Tabela 1).

Tabela 1 – Nível de Controle Operacional ($\boldsymbol{NCO}$)

Nível	Condição	M_{seg} (h)	Tx_{elev} (m/h)	Ações Principais
1 Normal	Situação estável	≥ 7	< 0,70	Operação normal; monitoramento a cada 6 h; revisão semanal de estratégias.
2 Atenção	Tendência de elevação	2,5 – 7	0,70 – 0,75	Reforçar monitoramento (1 h); alertar equipes; colocar plano de evacuação em prontidão.
3 Alerta	Condição crítica iminente	1,5 – 2,5	0,75 – 0,80	Restringir acessos; suspender frentes de maior risco; comunicação direta com coordenação.
4 Evacuação	Risco extremo, chuva intensa	≤ 1,5	≥ 0,80 (ou previsão severa)	Evacuação imediata; suspensão total das obras; acionamento do protocolo de emergência.

2.3 Plano de Ação (TARP)

O *Trigger Action Response Plan* (TARP) associa cada NCO a um conjunto de ações de engenharia e comunicação, garantindo resposta preventiva e redução de atrasos decisórios (Tabela 2).

Tabela 2 – Protocolo de Ação por Nível de Controle Operacional.

Nível	Ação	Ações de Engenharia	Comunicação e Gestão
1 Normal	A cada 6 h	Operação normal; verificação de instrumentos e atualização de dados.	Comunicação preventiva ao gestor; manutenção da prontidão das equipes.
2 Atenção	A cada 1 h	Inspeção de frentes próximas a áreas inundáveis; priorização de frentes seguras.	Briefings com equipes; alerta à coordenação; checagem dos canais de emergência.
3 Alerta	A cada 15 min	Suspensão de frentes críticas; mobilização de veículos e rotas de fuga; reforço de barreiras emergenciais.	Comunicação direta com Centro de Controle; acionamento das equipes de segurança; validação da cadeia de comando.
4 Evacuação	Monitoramento contínuo	Interrupção total das atividades em áreas de risco; execução do plano de evacuação; acompanhamento de níveis em tempo real.	Acionamento do Plano de Comunicação; aviso a stakeholders; disparo de sirenes ou outros alertas sonoros.

Em situação de Nível 4, após a evacuação e posterior finalização de vertimento pelo extravasor, fica o empreendedor encarregado de avaliar as condições de risco residuais para a retomada da operação das obras.

2.4 Dimensionamento da Evacuação

A evacuação foi dimensionada conforme a Resolução GMG nº 83/2025 [12], considerando densidade populacional, velocidade de deslocamento e restrições geométricas das rotas de fuga.

2.4.1 Densidade Populacional (d)

A densidade da área analisada foi estimada pela Equação (3), considerando população fixa e flutuante, com valor definido de forma conservadora, em que d é a densidade populacional (pessoas/m²), p é a população inserida; e A é a área total do caminho da rota de fuga (m²).

$$d = p / a \qquad (3)$$

2.4.2 Velocidade de Deslocamento (v)

A velocidade média foi definida em função da densidade e do tipo de terreno, conforme a Resolução GMG nº 83/2025. Para baixas densidades, adota-se velocidade constante; em maiores densidades, aplicam-se relações empíricas (Tabela).

Tabela 3 – Velocidade média de deslocamento (Resolução GMG nº 83/2025)

Densidade (pessoas/m²)	**Velocidade – Terreno plano (m/s)**	**Velocidade – Terreno inclinado ou com escadas (m/s)**
≤ 0,54	1,20	1,05
> 0,54 a ≤ 1,00	1,03	0,90
> 1,00 a ≤ 1,50	0,84	0,74
> 1,50 a ≤ 2,00	0,66	0,58
> 2,00	$V = 1{,}40 - 0{,}372 \cdot D$	$V = 1{,}23 - 0{,}327 \cdot D$

2.4.3 Tempo de Evacuação do Setor (T_{EVAC})

O Tempo de Evacuação do Setor (T_{EVAC}) foi calculado a partir da razão entre a distância máxima a ser percorrida ao longo da rota de fuga e a velocidade média de deslocamento, conforme a Equação (4), onde d é a distância máxima do ponto mais distante até a área segura, e v é a velocidade média de deslocamento estimada.

$$T_{EVAC} = d/v \tag{4}$$

2.4.4 Tempo Máximo de Deslocamento (T_{DESL})

Definido como o maior tempo de evacuação entre as rotas avaliadas; neste estudo, o valor obtido para o setor do extravasor foi adotado diretamente.

2.4.5 Tempo de Estrangulamento (T_{EST})

Corresponde ao tempo necessário para transpor o ponto de maior afunilamento da rota, considerando evacuação simultânea da população flutuante (Equação 5), onde N é o número total de pessoas a serem evacuadas, e L é a largura, em metros, do ponto crítico de estrangulamento do acesso à área segura.

$$T_{EST} = \frac{1{,}2 \cdot N}{79 \cdot L} \tag{5}$$

2.4.6 Tempo Total de Evacuação (TTE)

O tempo total resulta da combinação entre o deslocamento e o estrangulamento, conforme as Equação 6 e (7):

$$Se\ T_{DESL} > T_{EST}, \qquad TTE = T_{DESL} + T_{EST} \tag{6}$$

$$Se\ T_{DESL} < T_{EST}, \qquad TTE = T_{EST} \tag{7}$$

A comparação entre o TTE e os cenários hidrológicos críticos simulados permite avaliar a existência de janela temporal suficiente para evacuação preventiva, mesmo em condições severas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resposta Hidrológica do Reservatório

As simulações hidrológicas realizadas permitiram caracterizar, de forma integrada, a dinâmica de elevação do nível d'água do reservatório sob condições extremas de precipitação, adotando-se como cenário crítico eventos com tempo de retorno de 10.000 anos. Foram avaliadas diferentes durações de chuva (24, 10, 8 e 6 horas), sendo considerada crítica aquela associada à resposta mais rápida do sistema em termos de início de vertimento.

Os resultados consolidados (Tabela 4) evidenciam que o tempo até o início do vertimento apresenta forte dependência da elevação inicial do reservatório.

Tabela 4 – Taxa de subida do reservatório considerando variações críticas de N.A em TR = 10.000 anos

Elevação Inicial do Reservatório (m)	Duração da Chuva Crítica Estudada (h)	TR (anos)	Momento de Início do Aumento do Reservatório (h)	Momento de Início do Vertimento (h)	Tempo do Trânsito de Cheias no Reservatório até o Vertimento (h)	Elevação no Início do Aumento do Reservatório (m)	Elevação no Início do Vertimento (m)	Taxa de Elevação (m/h)
El. 517 m	24	10.000	09:00	22:00	13,00	517,10	525,30	0,63
	10		04:30	16:30	12,00	517,10	525,10	0,67
	8		04:00	-	-	517,10	524,90	-
	6		03:15	-	-	517,10	524,40	-
El. 518 m	24	10.000	09:00	21:00	12,00	518,10	525,80	0,64
	10		04:30	13:30	9,00	518,10	525,00	0,77
	8		04:00	13:20	9,33	518,10	525,10	0,75
	6		03:15	14:15	11,00	518,10	525,00	0,63
El. 519 m	24	10.000	09:00	19:00	10,00	519,10	525,20	0,61
	10		04:30	12:30	8,00	519,10	525,50	0,80
	8		04:00	11:40	7,67	519,10	525,30	0,81
	6		03:15	11:00	7,75	519,10	525,10	0,77
El. 520 m	24	10.000	09:00	18:00	9,00	520,10	525,40	0,59
	10		04:30	11:30	7,00	520,10	525,60	0,79
	8		04:00	10:20	6,33	520,10	525,20	0,81
	6		03:15	09:30	6,25	520,10	525,10	0,80
El. 521 m	24	10.000	09:00	17:00	8,00	521,10	525,70	0,58
	10		04:30	10:30	6,00	521,10	525,80	0,78

Elevação Inicial do Reservatório (m)	Duração da Chuva Crítica Estudada (h)	TR (anos)	Momento de Início do Aumento do Reservatório (h)	Momento de Início do Vertimento (h)	Tempo do Trânsito de Cheias no Reservatório até o Vertimento (h)	Elevação no Início do Aumento do Reservatório (m)	Elevação no Início do Vertimento (m)	Taxa de Elevação (m/h)
	8		04:00	09:20	5,33	521,10	525,30	0,79
	6		03:15	08:30	5,25	521,10	525,30	0,80
El. 522 m	24	10.000	09:00	16:00	7,00	522,10	525,90	0,54
	10		04:30	09:30	5,00	522,10	525,80	0,74
	8		04:00	08:20	4,33	522,10	525,20	0,72
	6		03:15	07:30	4,25	522,10	525,20	0,73
El. 523 m	24	10.000	09:00	15:00	6,00	523,10	526,10	0,50
	10		04:30	08:30	4,00	523,10	525,70	0,65
	8		04:00	07:20	3,33	523,10	525,00	0,57
	6		03:15	06:30	3,25	523,10	525,00	0,58
El. 524 m	24	10.000	09:00	13:00	4,00	524,10	525,40	0,32
	10		04:30	07:00	2,50	524,10	525,10	0,40
	8		04:00	06:20	2,33	524,10	525,10	0,43
	6		03:15	05:30	2,25	524,10	525,10	0,44

Observa-se redução sistemática do tempo até o início do vertimento com o aumento da elevação inicial do reservatório, variando de aproximadamente 12 h (El. 517 m) para cerca de 2 h (El. 524 m), considerando como referência o início do evento de precipitação. Esse comportamento evidencia elevada sensibilidade às condições iniciais de armazenamento.

A duração da chuva também exerce influência significativa na resposta hidrológica. Eventos de menor duração (6 a 10 h), associados a maiores intensidades, resultam em respostas mais rápidas, com antecipação do vertimento e redução do tempo de trânsito da cheia, conforme indicado na Tabela 4 e na Figura 2.

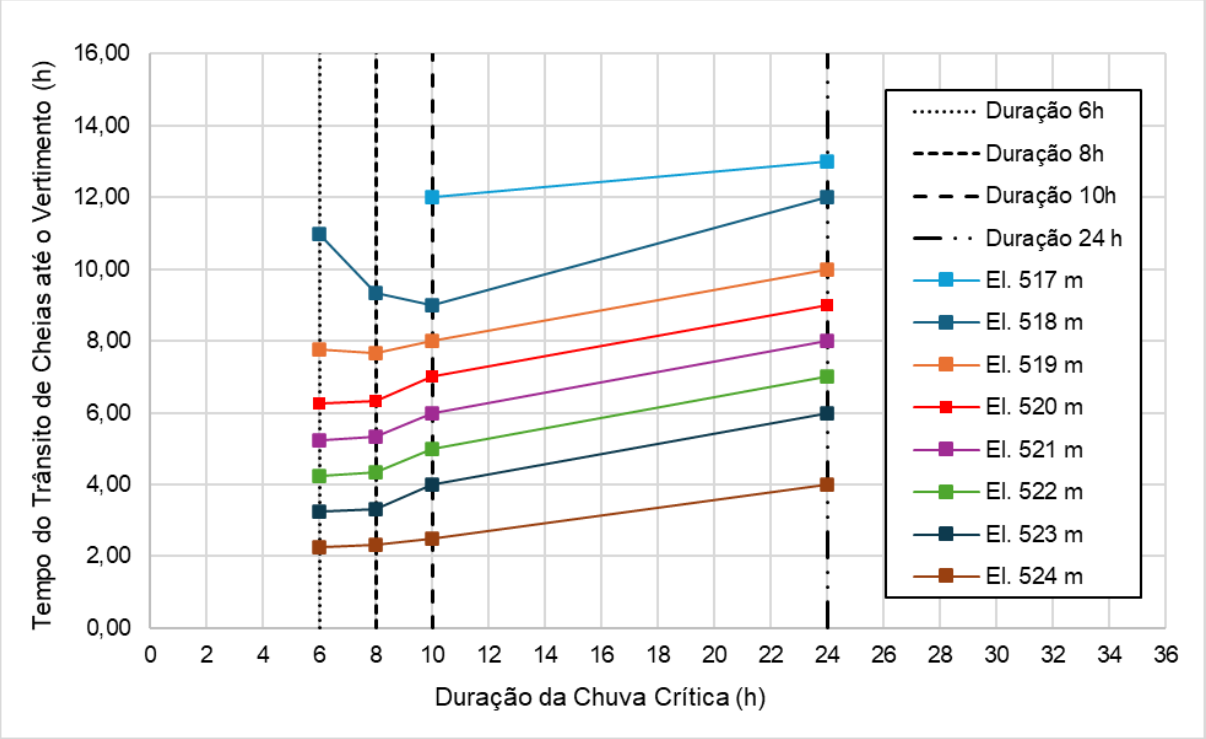


Figura 2 – Tempo até o início do vertimento para duração de chuvas no TR = 10.000 anos

Os resultados indicam que a resposta do reservatório é controlada pela interação entre armazenamento disponível e intensidade do evento, resultando em relação não linear entre taxa de elevação e tempo até o início do vertimento. Assim, a avaliação de risco operacional deve considerar simultaneamente a cota do reservatório e a taxa de variação do nível d'água.

3.2 Desempenho do Plano de Evacuação frente aos Cenários Críticos

Como indicado, o atingimento do Nível 4 do TARP implica o acionamento imediato do Plano de Evacuação da área operacional. O dimensionamento da evacuação foi realizado com base na metodologia estabelecida no Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM) da Barragem, considerando as características específicas da população flutuante envolvida nas obras do extravasor.

Os parâmetros adotados e os resultados obtidos estão sintetizados na Tabela .

Tabela 5 – Resultados do Dimensionamento da Evacuação

Parâmetros	Valor	Unidade
Densidade populacional	0,009	pessoas/m²
Velocidade de Escoamento	1,05	m/s
Tempo de Evacuação do Setor	10,51	minutos
Tempo Máximo de Deslocamento	10,51	minutos
Tempo de Estrangulamento	0,0091	segundos
Tempo total de Evacuação	10,51	minutos

O Tempo de Evacuação do Setor (TES) foi calculado a partir de uma distância máxima de 663 m e velocidade média de deslocamento de 1,05 m/s, resultando em aproximadamente 631 segundos (10 minutos e 51 segundos), em conformidade com os critérios da Resolução GMG nº 83/2025.

Observa-se que o tempo de estrangulamento (TE), calculado com base na largura mínima da rota de fuga (5 m) e na população considerada (30 pessoas), apresenta valor desprezível quando comparado ao tempo de deslocamento, não influenciando significativamente o tempo total de evacuação. Dessa forma, o Tempo Total de Evacuação (TTE) é essencialmente governado pelo tempo de deslocamento ao longo da rota.

Os resultados indicam que a rota de fuga apresenta condições favoráveis à evacuação segura, caracterizadas por baixa densidade populacional e elevada capacidade de escoamento, mantendo o fluxo em regime livre. As velocidades adotadas são compatíveis com deslocamentos em terreno inclinado ou com desníveis suaves, conforme estabelecido pela GMG nº 83/2025 [12], apresentados na Tabela 3.

Adicionalmente, os resultados obtidos nos exercícios simulados do PAEBM indicaram tempos de evacuação entre 4 minutos e 41 segundos e 5 minutos e 20 segundos, significativamente inferiores ao valor analítico adotado. Essa diferença confirma o caráter conservador da metodologia empregada, garantindo margem adicional de segurança para a evacuação da população flutuante.

Dessa forma, conclui-se que o tempo total de evacuação adotado (10,51 minutos) é adequado e conservador, sendo compatível com os cenários hidrológicos críticos analisados e suficiente para garantir a segurança dos trabalhadores, desde que os gatilhos operacionais sejam acionados de forma tempestiva.

3.3 Integração entre Evacuação e Cenários Hidrológicos

A aplicação dos critérios de Nível de Controle Operacional (NCO) aos cenários simulados indica que, para elevações iniciais mais baixas (El. 517-520 m), as condições tendem a se enquadrar nos Níveis 1 e 2, caracterizados por margens de segurança superiores a 5 horas e taxas de elevação inferiores a 0,80 m/h.

Por outro lado, para níveis mais elevados do reservatório (El. 521-524 m), especialmente sob eventos de curta duração (6 a 10 h), observa-se a transição para Níveis 3 e 4, nos quais as margens de segurança são reduzidas (≤ 2,5 h) e as taxas de elevação se aproximam ou ultrapassam os limiares críticos.

Esses resultados confirmam a aplicabilidade do NCO como ferramenta de suporte à decisão, permitindo a identificação antecipada de condições operacionais críticas e o acionamento tempestivo das medidas de controle e evacuação.

A comparação entre o Tempo Total de Evacuação (~11 min) e os tempos mínimos para início do vertimento, mesmo nos cenários mais críticos (≥ 2 h), demonstra a existência de margem temporal significativa para evacuação preventiva da população flutuante. Isso confirma que, com acionamento tempestivo dos gatilhos operacionais e monitoramento em tempo real, o risco à integridade física dos trabalhadores é adequadamente mitigado [16], tal como apresentado pelo esquema da Figura 3.

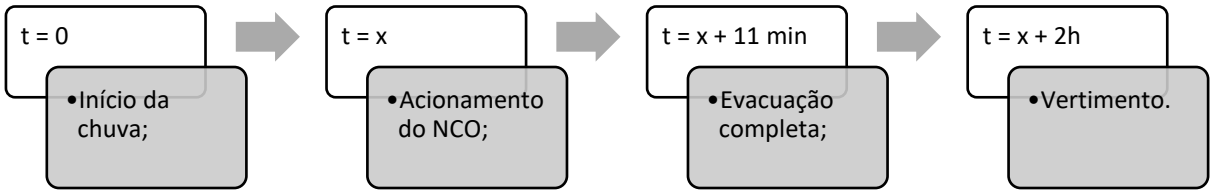


Figura 3 – Comparação entre o Tempo Total de Evacuação e os tempos mínimos até o vertimento por nível inicial do reservatório (TR = 10.000 anos)

Isso mostra que a análise foi conduzida de forma conservadora, tanto na estimativa populacional quanto nos parâmetros de deslocamento, o que aumenta a confiabilidade dos resultados e reforça sua aplicabilidade prática no contexto do Plano de Contingência.

3.4 Efetividade das Medidas Preventivas do Plano de Contingência

As medidas preventivas adotadas no Plano de Contingência mostram-se coerentes com os cenários hidrológicos simulados e com os tempos críticos identificados. O monitoramento em tempo real, operando de forma contínua e redundante, constitui o principal elo entre os resultados das simulações e a tomada de decisão operacional, permitindo a aplicação prática dos limites definidos para interrupção de atividades e acionamento da evacuação, em linha com plataformas modernas de segurança de barragens que combinam IoT, e sistemas de alerta para avaliação contínua de segurança e disparo de ações preventivas [17].

A implantação de um canal de desvio a jusante representa uma camada adicional de segurança hidráulica, reduzindo a probabilidade de obstruções durante as intervenções no extravasor e mitigando riscos associados a vertimentos não controlados [10]. De forma complementar, o uso do sistema de bombeamento como ferramenta auxiliar de controle do nível d'água contribui para a manutenção das cotas operacionais seguras em condições ordinárias, sem comprometer o princípio

fundamental de que o extravasor permanece como o principal elemento de segurança para eventos extremos.

Do ponto de vista conceitual, o arranjo dessas medidas configura uma estratégia preventiva multicamadas, alinhada às boas práticas internacionais para gestão de risco em barragens durante fases transitórias [18], nas quais o risco hidrológico tende a ser temporariamente elevado.

3.5 Validação Operacional e Discussão Crítica

Os simulados de evacuação apresentaram tempos significativamente inferiores aos estimados analiticamente (4 min 41 s e 5 min 20 s), confirmando o caráter conservador da metodologia adotada. Essa diferença é esperada e desejável em estudos de segurança, pois indica que os valores calculados oferecem margem adicional de proteção diante de incertezas operacionais [19].

A principal contribuição do estudo está na integração quantitativa entre a resposta hidrológica do reservatório, os limites operacionais e o desempenho da evacuação, criando um elo direto entre engenharia hidráulica e gestão de emergências. Abordagens análogas vêm sendo propostas na literatura de cheias e rompimento de barragens, integrando modelos hidrodinâmicos de propagação de onda de cheia com redes viárias, abrigos e comportamento de evacuação, a fim de otimizar rotas, minimizar o tempo de deslocamento e reduzir o risco de perda de vidas [20]. Essa abordagem reforça a robustez técnica do Plano de Contingência e pode ser replicada em outros empreendimentos, desde que ajustada às condições geométricas e operacionais de cada caso.

4. CONCLUSÕES

Conclui-se que o estudo desenvolvido permitiu estabelecer uma abordagem técnica robusta e preventiva para a gestão de riscos hidrológicos associados à operação da barragem durante intervenções no sistema extravasor. A aplicação sistemática de simulações de trânsito de cheias, aliada à definição de níveis operacionais graduados e ações correspondentes, possibilitou a antecipação de cenários críticos e a estruturação de respostas proporcionais ao aumento do nível de água no reservatório, reforçando a segurança operacional e a proteção das equipes envolvidas.

Os resultados demonstraram que, mesmo no cenário mais crítico (El. 524 m, chuva de 6 h, TR = 10.000 anos), o tempo mínimo até o vertimento (~2 h) supera amplamente o Tempo Total de Evacuação calculado (~11 min), confirmando a adequação dos $NCOs$ definidos.

Adicionalmente, a incorporação de medidas preventivas, a avaliação da eficiência dos sistemas de rebaixamento e a análise histórica das precipitações contribuíram para um entendimento mais consistente do regime hidrológico local e de sua influência no comportamento do reservatório. Nesse contexto, o trabalho demonstra que a integração entre modelagem hidrológica, monitoramento contínuo e planejamento de ações contingenciais constitui uma estratégia eficaz para reduzir incertezas, mitigar

riscos residuais e apoiar a tomada de decisão em condições hidrometeorológicas adversas, fortalecendo a gestão da segurança de barragens em ambientes operacionais complexos.

5. PALAVRAS-CHAVE

Barragens de Mineração; Gestão de Risco Operacional; Obras em Época Chuvosa; Simulação Hidrológica; Plano de Contingência.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC (2021) – Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.

[2] APEL, H.; THIEL, A.; BUCHHOLZ, O.; KREIBICH, H. (2004) – Flood Risk Assessment and Associated Uncertainty. Natural Hazards and Earth System Sciences, v. 4, p. 295-308. [S.L.]

[3] UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS – USACE (2014) – Risk-Based Analysis for Dam Safety. Washington, Estados Unidos.

[4] FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. (2000) – The Statistics of Embankment Dam Failures and Accidents. Géotechnique, v. 50, n. 3, p. 291-302. Londres, Reino Unido.

[5] AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM (2022) – Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. Brasília, Brasil.

[6] WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION – WMO (2013) – Manual on Flood Forecasting and Warning. WMO-No. 1072. Genebra, Suíça.

[7] VICK, S. G. (2002) – Degrees of Belief: Subjective Probability and Engineering Judgment. Reston: ASCE Press, Estados Unidos.

[8] PORTO, R. M. (2006) – Hidráulica Básica. 4. ed. São Carlos: EESC/USP, Brasil.

[9] AZAM, S.; LI, Q. (2010) – Tailings Dam Failures: A Review of The Last One Hundred Years. Geotechnical News, v. 28, n. 4, p. 50-54. [S.L.]

[10] TUCCI, C. E. M. (2005) – Modelos Hidrológicos. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, Brasil.

[11] WITT, A.; MALAMUD, B. D.; KILBURN, C. R. J. (2017) – Quantitative analysis of Historical Dam Failures in the UK. Landslides, v. 14, p. 281-294. [S.L.]

[12] MINAS GERAIS. (2025) – Resolução GMG nº 83, de 2025: Dispõe sobre Diretrizes para Gestão de Risco e Segurança Em Barragens no Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, Brasil.

[13] SOCIETY OF FIRE PROTECTION ENGINEERS – SFPE (2016) – Handbook of Fire Protection Engineering. 5. ed. New York: Springer, Estados Unidos.

[14] HELBING, D.; MOLNÁR, P. (1995) – Social Force Model for Pedestrian Dynamics. Physical Review. v. 51, n. 5, p. 4282-4286. [S.L.]

[15] KULIGOWSKI, E. D.; PEACOCK, R. D.; HOSKINS, B. L. (2010) – A Review of Building Evacuation Models. NIST Technical Note 1680. Gaithersburg, Estados Unidos.

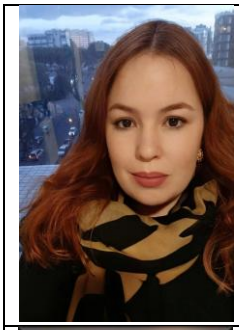
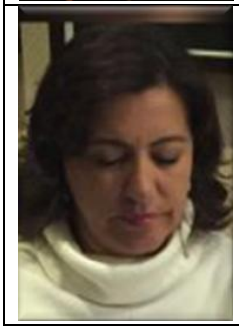
[16] MCDONALD, N.; LANGFORD, D.; WILSON, S. (1999) – The Role of Time in Accident Analysis. Safety Science, v. 33, n. 1-2, p. 1-17. [S.L.]

[17] ZHANG, L.; XU, Y.; JIA, J.; WANG, Y. (2021) – Smart Dam Safety Monitoring Based on IOT and Data-Driven Technologies: A Review. Journal of Cleaner Production, v. 278, 123979. [S.L.].

[18] FELL, R.; BOWLES, D. S.; ANDERSON, L. R.; BELL, G. (2005) – The Status of Methods for Estimation of The Probability of Failure of Dams And Levees. Canadian Geotechnical Journal, v. 42, n. 2, p. 530-541. [S.L.].

[19] AVEN, T. (2011) – On the New ISO Guide on Risk Management Terminology. Reliability Engineering & System Safety, v. 96, n. 7, p. 719-726. [S.L.].

[20] DOTTORI, F.; SALAMON, P.; BIANCHI, A.; ALFIERI, L.; HIRPA, F.; FEYEN, L. (2016) – Development and evaluation of a framework for global flood hazard mapping. Advances in Water Resources, v. 94, p. 87-102. [S.L.].

	**Luisa de Moura LEÃO** Engenheira Civil Geotécnica, doutora em Geotecnia (UFOP) e mestra em Saneamento e Geotecnia Ambiental (UFLA). Possui 8 anos de experiência em geotecnia aplicada à mineração, com atuação em segurança de barragens e pilhas, fechamento de minas, modelagem numérica e gestão de riscos com foco climático e normativo.
	**Marta Aparecida Sawaya MIRANDA** Geóloga/Geotécnica, mestra em Engenharia de Barragens (UFOP) e graduada em Geologia (UFMG). Possui mais de 20 anos de experiência em geotecnia de mineração, com atuação em segurança, auditoria de barragens, projetos de pilhas e descaracterização, incluindo estudos geológico-geotécnicos, hidráulicos e de liquefação. Auditora cadastrada na FEAM e ANM.

	**Bruno Manassés Alves BATISTA** Engenheiro de Minas (UFMG), especialista em barragens de rejeito (Unyleya) e pós-graduando em Engenharia Sanitária e Ambiental. Possui mais de 10 anos de experiência em consultoria mineral, com atuação em estudos hidrológicos e geotécnicos, segurança de estruturas, análises de ruptura e licenciamento ambiental em Minas Gerais.
	**Marconi Bicalho CESCO** Engenheiro de Minas (UFMG), M.Eng. em Engenharia Geotécnica (PUC Minas) e mestrando em Engenharia Mineral (UFOP). Possui 13 anos de experiência em mineração, com atuação em gestão e operação de mina, planejamento de lavra e projetos de mineração e geotecnia.
	**Letícia Thomaz de Souza VIEIRA** Graduanda em Engenharia de Minas (UFMG) e técnica em Edificações (CEFET-MG). Atua no apoio a estudos geotécnicos, análise de dados e elaboração de materiais técnicos, com foco em segurança.