1º HIDROGEOMINAS
SIMPÓSIO MINEIRO DE HIDROGEOMORFOLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS
07 – 10 de setembro de 2026
Departamento de Geografia – UFMG
Belo Horizonte - MG

RELAÇÃO ENTRE CHUVAS E ROMPIMENTOS DE BARRAGENS DE REJEITOS DE MINÉRIOS: ESTUDO DE CASO PARA MINAS GERAIS

Douglas do Amaral Goulart e Silva [1]
Maria Alice Machado Rodrigues [2]
Vinícius Siqueira Oliveira Carvalho [3]
Arcilan Trevenzoli Assireu [4]

RESUMO

Os rompimentos de barragens de rejeitos em Minas Gerais representam uma ameaça recorrente com impactos socioambientais e econômicos devastadores, o que torna urgente a compreensão dos fatores que desencadeiam tais desastres. Este estudo investiga a relação entre eventos de precipitação intensa e o colapso de oito barragens de mineração no estado, ocorridos entre 2001 e 2019. A pesquisa justifica-se pela necessidade de aprimorar o monitoramento climático como estratégia de prevenção de riscos e adaptação às emergências climáticas. A área de estudo compreende diversas regiões de Minas Gerais, focando em municípios como Mariana, Brumadinho, Itabirito, Nova Lima, Miraí, Cataguases e Ouro Preto. Metodologicamente, foram integrados dados de satélite do produto MERGE (CPTEC/INPE) com dados de estações pluviométricas terrestres das plataformas Hidroweb (ANA) e CEMADEN. As análises foram realizadas com foco na precipitação acumulada nos 14 dias anteriores a cada evento de ruptura. Os resultados indicam que a precipitação foi identificada como fator contribuinte em 75% dos casos analisados (seis de oito eventos), nos quais chuvas persistentes ou picos de intensidade horária precederam os rompimentos. Tais eventos contribuíram para a saturação do solo e o aumento da pressão hídrica interna. Nos casos em que a chuva não foi o fator principal, as falhas foram associadas a problemas de gestão ou deficiências estruturais. Conclui-se que o monitoramento meteorológico de alta resolução é uma ferramenta crucial para a segurança de barragens e para a mitigação de desastres em regiões dependentes da mineração.

Palavras-chave: Monitoramento Climático; Gestão de Riscos; Produto MERGE; Saturação do Solo; Impactos Socioambientais.

INTRODUÇÃO

A mineração desempenha um papel fundamental no desenvolvimento econômico global e, no Brasil, possui uma trajetória de mais de 300 anos, representando atualmente cerca de 1,4% do Produto Interno Bruto (PIB) (IBRAM, 2016). Entretanto, o crescimento acelerado desta atividade trouxe desafios complexos, especialmente no que tange à gestão de barragens de rejeitos, estruturas

[1] Graduando do Curso de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, douglas.ags99@hotmail.com;
[2] Dra. em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, mariaalicemr@unifei.edu.br;
[3] Dr. em Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, vsiqueira18@gmail.com;
[4] Professor orientador: Titular da Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, arcilan@unifei.edu.br.

projetadas para conter os subprodutos do beneficiamento mineral. Em Minas Gerais, a recorrência de colapsos dessas estruturas tem gerado catástrofes socioambientais e humanas de proporções devastadoras, como os casos emblemáticos de Mariana (2015) e Brumadinho (2019).

Estudos indicam que a segurança de barragens depende de uma combinação de fatores que inclui projeto, operação e monitoramento contínuo, mas a vulnerabilidade estrutural é frequentemente exacerbada por eventos de precipitação intensa (ÁVILA et al., 2021). Conforme destacado no Relatório Anual de Segurança de Barragens (RSB), chuvas prolongadas e intensas podem saturar o solo e o maciço da barragem, elevando as poropressões internas e aumentando o risco de liquefação e ruptura (ANA, 2021). Diante de um cenário de emergências climáticas, no qual se projeta um aumento na frequência e intensidade de eventos extremos no Sudeste brasileiro (REBOITA et al., 2020), a compreensão da dinâmica hídrica sobre essas estruturas torna-se vital para a mitigação de desastres.

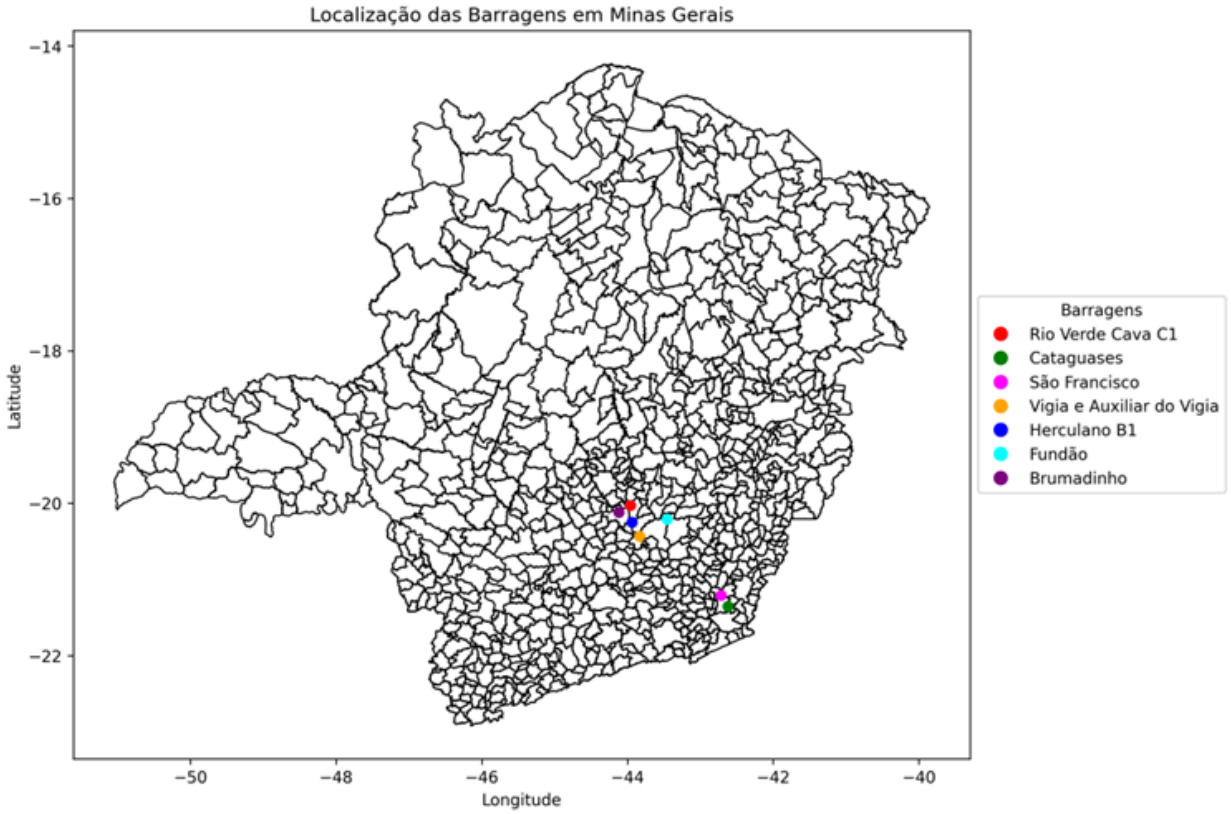
O objetivo principal deste estudo é investigar, por meio de dados de chuva medidos e modelados, a relação entre eventos de precipitação e o rompimento de oito barragens de rejeitos no estado de Minas Gerais ocorridos entre 2001 e 2019. Esta pesquisa está inserida no âmbito do Projeto FAPEMIG/RENOVA, intitulado “Derivadores rastreados por satélite para estudos acerca da restauração do Rio Doce”. A justificativa desta pesquisa fundamenta-se na necessidade de aprimorar o monitoramento climático e a previsão meteorológica como ferramentas estratégicas para a segurança de barragens e a salvaguarda das comunidades a jusante.

Metodologicamente, o estudo utiliza uma abordagem integradora, combinando dados terrestres de redes pluviométricas (ANA e CEMADEN) com o produto MERGE do CPTEC/INPE, que funde observações de superfície e estimativas de satélite. A análise foi processada em linguagem Python, permitindo correlacionar os acumulados de chuva nos períodos antecedentes aos desastres com as falhas registradas.

ÁREA DE ESTUDO

A área selecionada para este estudo compreende o estado de Minas Gerais, com foco específico em oito casos de rompimento de barragens distribuídos em sete municípios, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Localização das Barragens em Minas Gerais.



Fonte: Autoria própria (2024).

Este estudo investiga eventos ocorridos nas seguintes localidades: a barragem Rio Verde Cava C1 (Nova Lima), a barragem de Cataguases (Cataguases), a barragem de São Francisco (Miraí), a Barragem do Vigia (Ouro Preto), a Barragem B1 – Herculano (Itabirito), a Barragem Fundão (Mariana) e a Barragem 1 (Brumadinho). A distribuição dessas estruturas reflete a alta concentração de atividades mineradoras no estado e evidencia a vulnerabilidade socioambiental das comunidades a jusante.

Em termos climáticos, Minas Gerais possui predominantemente um clima tropical de altitude, apresentando uma sazonalidade pluviométrica marcante. O período de verão é caracterizado por chuvas intensas, com acumulados que variam entre 200 e 250 mm mensais, atingindo picos críticos em dezembro e janeiro (DE OLIVEIRA et al., 2023). Em contrapartida, o inverno (maio a julho) é seco, com precipitações frequentemente inferiores a 50 mm por mês (DE OLIVEIRA et al., 2023). A convergência entre a intensa atividade mineradora e esses padrões

climáticos intensos torna a região uma área de monitoramento prioritário para a gestão de segurança de barragens.

MATERIAIS E MÉTODOS

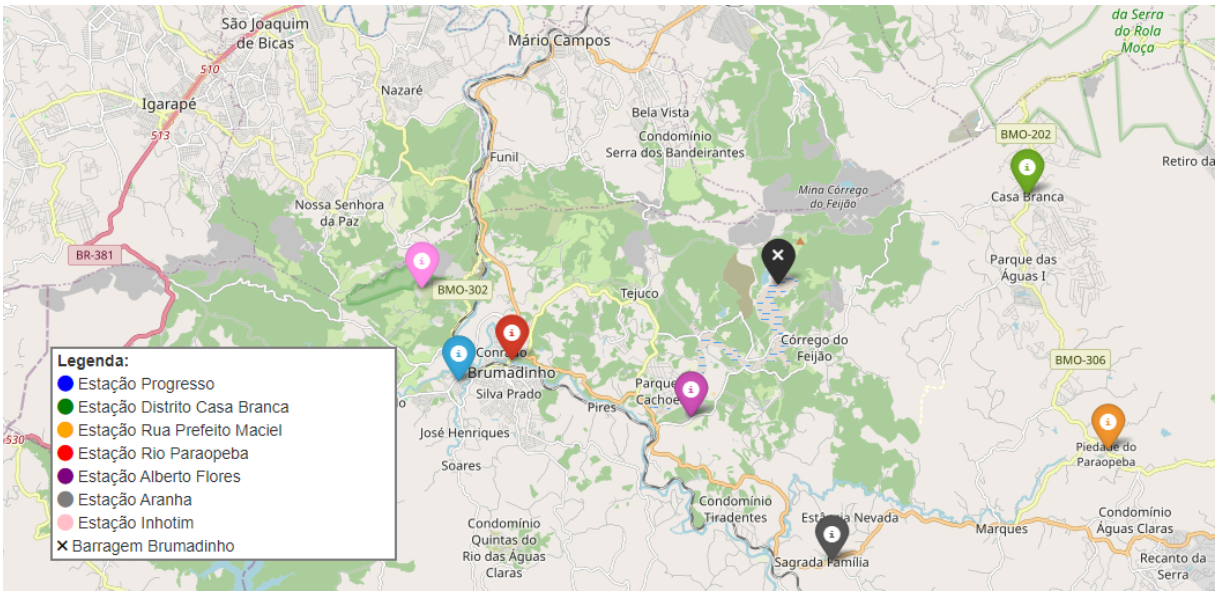
A metodologia deste estudo fundamentou-se no processamento e análise de dados hidrometeorológicos em ambiente computacional Python. Foram empregadas bibliotecas especializadas para a manipulação de grandes volumes de dados e visualização geoespacial, com destaque para: Pandas e NumPy para tratamento de séries temporais; Xarray e cfgrib para a leitura de arquivos meteorológicos complexos (formato GRIB2); e Matplotlib, Cartopy e Plotly para a geração de gráficos e mapas.

O método de análise consistiu na técnica retrospectiva de eventos críticos, utilizando uma janela temporal de 14 dias anteriores a cada rompimento. Essa abordagem permitiu analisar a relação entre os limiares de precipitação acumulada (saturação) e horária (intensidade) com os registros históricos de falha das oito estruturas analisadas.

Para a caracterização da precipitação, utilizaram-se duas fontes de dados complementares:

1. **Dados Pluviométricos de Superfície:** Obtidos através da plataforma Hidroweb (Agência Nacional de Águas - ANA) e da rede de monitoramento do CEMADEN. Esses dados terrestres foram fundamentais para a análise detalhada dos rompimentos ocorridos a partir de 2014 (Herculano, Fundão e Brumadinho), permitindo a verificação da precipitação em escalas horária e diária. Através do uso de mapas interativos e scripts em Python, foi possível selecionar as estações mais próximas a cada estrutura, conforme exemplificado na Figura 2 para o caso de Brumadinho.

Figura 2 – Distribuição das estações pluviométricas para a barragem de Brumadinho.



Fonte: Autoria Própria (2024).

2. **Dados de Satélite (Produto MERGE):** Fornecidos pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE), o produto MERGE combina observações terrestres com estimativas de precipitação por satélite do sistema GPM IMERG. Este recurso possui resolução espacial de 0,1º e temporal de até 30 minutos, sendo essencial para cobrir todos os oito eventos analisados desde o ano 2000.

O procedimento analítico consistiu no recorte espacial dos dados para as coordenadas de Minas Gerais e na extração de séries temporais para os pontos específicos de cada barragem. Foram analisados os períodos de 14 dias anteriores a cada data de rompimento, calculando os acumulados de chuva em escalas de 24 horas e horárias para identificar padrões de saturação do solo ou picos de intensidade pluviométrica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos oito eventos ocorrida entre 2001 e 2019 permitiu identificar que a precipitação atuou como um gatilho para a falha das estruturas em 75% dos casos estudados. Para facilitar a comparação direta entre as variáveis analisadas e os danos registrados, o Quadro 1 sintetiza os eventos, evidenciando que a saturação por chuvas persistentes atua como um importante condicionante de instabilidade para as barragens no estado de Minas Gerais.

Quadro 1 – Resumo dos principais rompimentos de barragens em Minas Gerais e a relação com eventos de precipitação.

NOME DA BARRAGEM	MUNICÍPIO	DATA DO ROMPIMENTO	DIAS ANTES COM CHUVA	DESCRIÇÃO DOS DIAS COM CHUVA (acumulados diários)	DANOS
Rio Verde Cava C1	Nova Lima - MG	22/06/2001	0	Não houve chuvas antes do rompimento	5 Mortes.
Florestal Cataguases	Cataguases - MG	29/03/2003	10	Chuva persistente de 13 a 24/03, picos em 17/03 (+20mm) e 23/03 (+18mm)	Vazamento de lixívia negra, contaminação da água a jusante.
São Franscisco	Miraí- MG	01/03/2006	6	Chuvas em 23/02 (+18mm), 27/02 (+18mm), 28/02 e 01/03 (16-18mm)	Vazamento de rejeito de bauxita, contaminação da água a jusante.
São Franscisco	Miraí - MG	10/01/2007	18	Chuvas intensas entre 23/12 e 10/01, com picos acima de 18mm nos dias 24/12, 25/12, 02/01 e 10/01	Vazamento de rejeito de bauxita, contaminação da água a jusante.
Auxiliar de Vigia	Miguel Burnier, Ouro Preto - MG	15/03/2008	9	Chuva significativa em 13/03 (+18mm) e 15/03 (+18mm)	Atingiu cerca de 40 residências de Ouro Preto e Congonhas.
Herculano B1	Itabirito - MG	10/09/2014	1	Precipitação em 03/09 (6-10mm em 2h), sem chuvas antes do rompimento	3 Mortes.
Fundão (Samarco)	Mariana - MG	05/11/2015	7	Acumulados de chuva em 22/10 a 28/10, com picos de 6-15mm	19 mortes, contaminação da água a jusante.
Brumadinho (Córrego do Feijão)	Brumadinho - MG	25/01/2019	3	Chuva intensa em 18/01 (18mm em 6h) e 20/01 (12mm em 3h)	270 mortes, contaminação ambiental a jusante.

Fonte: Autoria própria (2024).

Relação entre Chuvas e Rompimentos

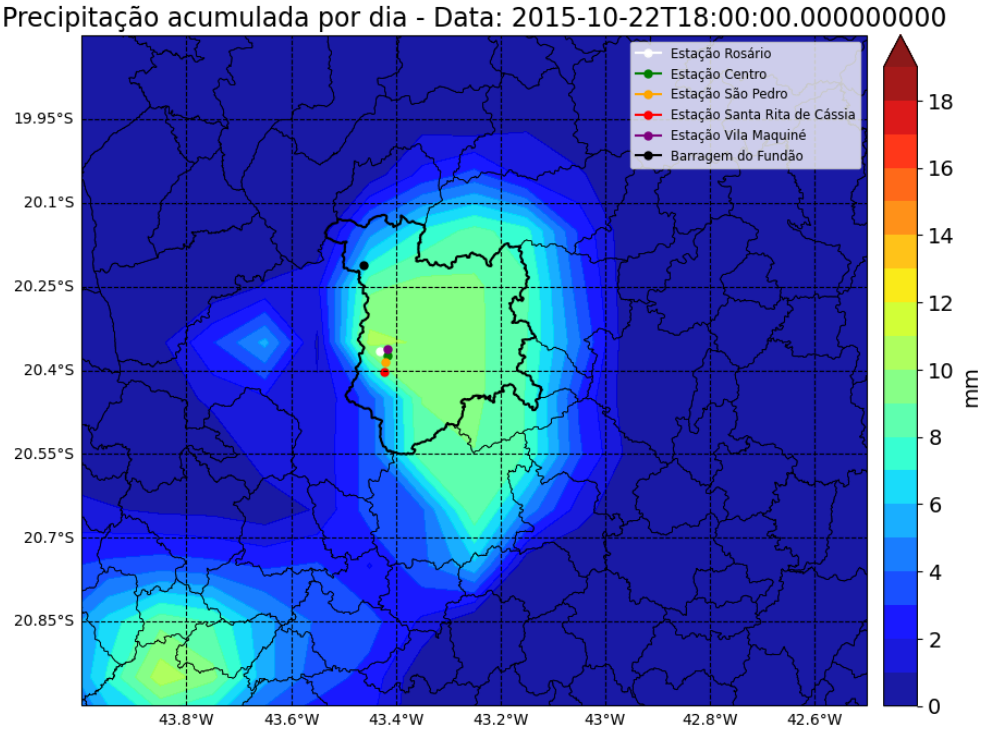
Os resultados indicam que a precipitação desempenhou um papel crucial na maioria dos rompimentos, atuando através da saturação do solo e do aumento da pressão hídrica interna. Eventos como Cataguases (2003), São Francisco (2006 e 2007), Vigia (2008), Fundão (2015) e Brumadinho (2019) apresentaram padrões de chuvas persistentes nos dias antecedentes. No caso de São Francisco em 2007, a sequência crítica de 18 dias consecutivos de chuva ilustra como a continuidade pluviométrica pode comprometer a segurança estrutural.

Esta observação converge com os achados de Leite et al. (2019) para a barragem de Fundão, onde o excesso de água acumulada nos dias anteriores ao colapso contribuiu diretamente para a

instabilidade. Da mesma forma, Ávila et al. (2021) corroboram esta perspectiva ao afirmarem que vulnerabilidades estruturais em barragens brasileiras são frequentemente exacerbadas por eventos de precipitação intensa.

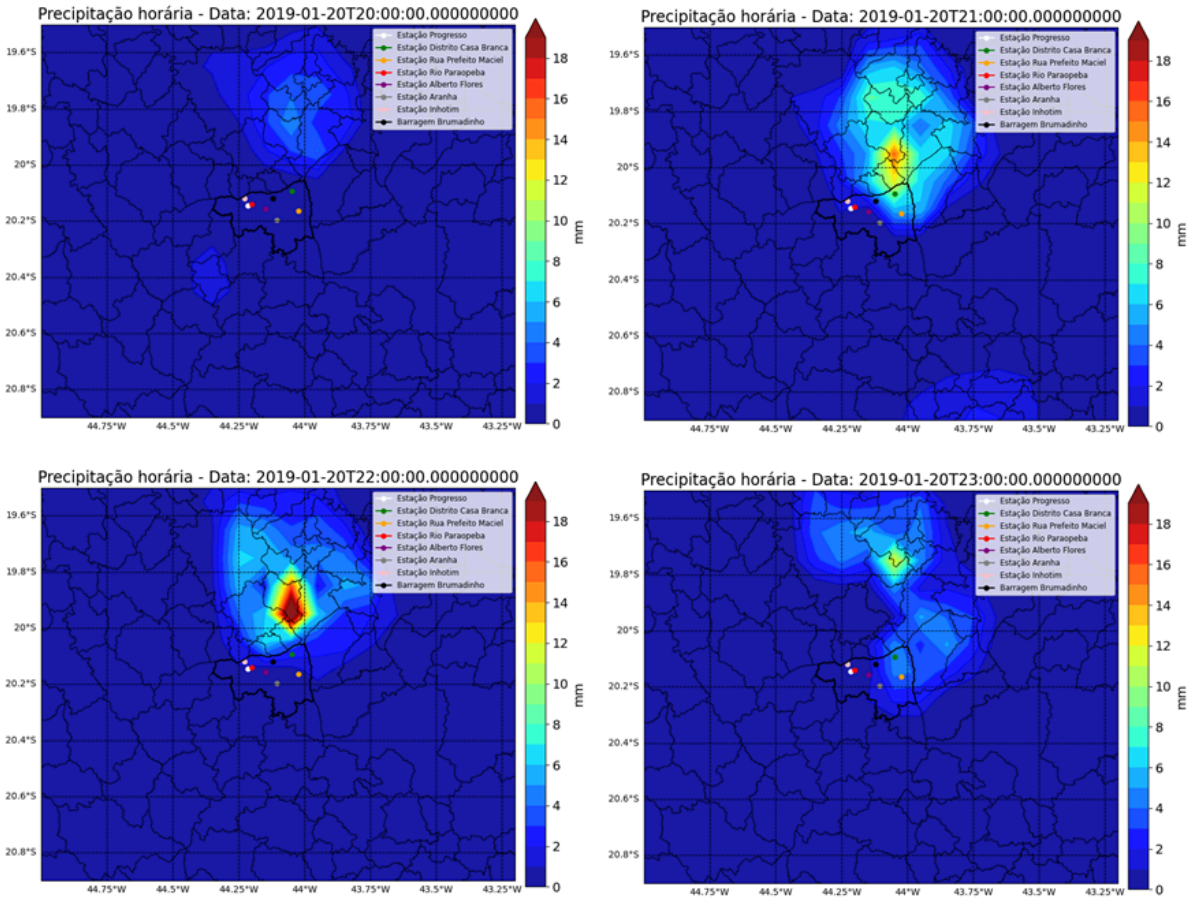
Em Brumadinho, embora os acumulados diários não tenham sido extremos, a concentração da chuva em curtos períodos (18 mm em 6 horas e 12 mm em 3 horas) aumentou a pressão interna, contribuindo para a liquefação dos rejeitos. Este resultado sustenta a hipótese central deste estudo, de que picos de intensidade horária, e não apenas o volume total acumulado, podem servir como gatilho para rupturas em estruturas já vulneráveis.

Figura 3 – Precipitação acumulada em 24h para Mariana - MG dia 22 de Outubro de 2015 às 18:00h.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

Figura 4 – Precipitação acumulada em 24h para Brumadinho - MG para o dia 20 de Janeiro de 2019 às 20:00h, 21:00h, 22:00h e 23:00h.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

Eventos sem Influência Pluviométrica Direta

Em contrapartida à hipótese pluviométrica, os casos de Rio Verde Cava C1 (2001) e Herculano B1 (2014) não apresentaram relação com eventos de chuva. Para a Cava C1, a tragédia foi atribuída a falhas em um processo de alteamento, enquanto para Herculano B1, investigações apontaram erros de gestão e disposição ilegal de rejeitos como as causas determinantes.

Esses resultados "discordantes" são fundamentais para a discussão, pois reforçam a análise de Ávila et al. (2021) de que a gestão inadequada e a falta de manutenção são fatores de risco tão críticos quanto os eventos climáticos. Portanto, a ausência de chuva nestes casos específicos demonstra que a segurança de barragens deve ser abordada de forma multifatorial, integrando o monitoramento climático à gestão rigorosa da infraestrutura.

A recorrência dos padrões observados nos demais casos reforça que o monitoramento climático de alta resolução é indispensável. A integração de dados de satélite (MERGE) e superfície permite identificar cenários críticos com antecedência, auxiliando na mitigação de impactos socioambientais.

CONCLUSÕES E/OU CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo demonstrou que a precipitação desempenha um papel crucial na estabilidade das barragens de rejeitos em Minas Gerais, atuando como um gatilho para rompimentos em 75% dos casos analisados (seis dos oito eventos estudados). A análise técnica dos dados pluviométricos indicou que a saturação do solo, resultante de chuvas persistentes ou de eventos de precipitação intensa em curtos períodos, é um fator determinante para o aumento da pressão hídrica interna e a consequente falha das estruturas.

Os resultados evidenciaram que impactos significativos na segurança das barragens ocorrem tanto em cenários de chuvas contínuas por vários dias, quanto em episódios de alta intensidade horária, como observado nos desastres de Brumadinho e Mariana. Por outro lado, os casos em que não houve correlação direta com a chuva reforçam que falhas de gestão ambiental e deficiências estruturais internas também representam riscos críticos que não podem ser negligenciados.

Conclui-se que a implementação de sistemas de monitoramento climático de alta resolução e a integração de dados de satélite e superfície são ferramentas essenciais para a antecipação de situações de risco. Diante do cenário de emergências climáticas e da intensificação de eventos hidrológicos extremos, essa vigilância torna-se indispensável para a mitigação de impactos socioambientais e para a salvaguarda da vida humana em regiões dependentes da mineração.

AGRADECIMENTOS

Gratidão à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pelo apoio institucional e infraestrutura disponibilizada para a realização deste estudo. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de Iniciação Científica (PIBIC), fundamental para o desenvolvimento da pesquisa. O autor agradece também à FAPEMIG e à Fundação Renova pelo apoio financeiro através do Projeto APQ-00405-19 (Chamada 010/2018). Um agradecimento especial ao orientador, Prof. Dr. Arcilan Trevenzoli Assireu, pela oportunidade, suporte técnico e valiosa orientação acadêmica ao longo de todo o projeto.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Relatório Anual de Segurança de Barragens**, 2021. Disponível em: https://www.snisb.gov.br/portal-snisb/documentos-e-capacitacoes/rsb. Acesso em: 11 set. 2024.

ÁVILA, J. P.; SAWAY, M.; SAYÃO, A. S. F.; FERREIRA, L. A. **Segurança de barragens de rejeitos no Brasil: avaliação dos acidentes recentes**, 2021. Disponível em: https://impactum-journals.uc.pt/geotecnia/article/view/10013/7338. Acesso em: 11 set. 2024.

CPTEC/INPE. **Descrição do produto MERGE**, 2023. Disponível em: <ftp.cptec.inpe.br>. Acesso em: 12 set. 2024.

DE OLIVEIRA, D. M. et al. **Hydrological and precipitation extremes and trends over the Paraíba do Sul River Basin, Brazil**. Climate, v. 11, p. 138, 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Gestão e manejo de rejeitos da mineração**. Brasília, DF: IBRAM, 2016. 128 p.

LEITE, J. A. O. et al. **Estudo dos impactos socioambientais causados pelo rompimento da barragem de Fundão em Mariana, MG**. Revista O Meio Ambiente Sustentável, Atena Editora, pp. 143-158, 2019.

REBOITA, M. S. et al. **Projeções climáticas para a América do Sul no cenário de aumento de chuvas extremas**. Climate Research, v. 76, n. 1, p. 12-23, 2020.