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

GEOINFORMAÇÃO APLICADA À AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE À EROSÃO DO SOLO EM ÁREA DE MINERAÇÃO: ESTUDO DE CASO PARA A BARRAGEM DE VARGEM GRANDE

Isabelli Souza da Silva Rodrigues [1]
Maria Alice Machado Rodrigues [2]
Vinícius Siqueira Oliveira Carvalho [3]
Arcilan Trevenzoli Assireu [4]

RESUMO

Barragens de rejeitos construídas pelo método de alteamento a montante representam um risco persistente em Minas Gerais devido à sua suscetibilidade à liquefação. A atividade mineradora altera o relevo e o escoamento superficial, intensificando processos erosivos. Este trabalho tem como objetivo avaliar se a variação de parâmetros ambientais pode ser utilizada como indicativo de risco em barragens de rejeitos, tomando como estudo de caso a barragem de Vargem Grande (Nova Lima, MG), de responsabilidade da VALE S.A., em operação desde 2000 e atualmente em processo de descaracterização. Foram utilizados modelos digitais de elevação (SRTM - 2001 e Copernicus - 2014) e dados de cobertura do solo, erodibilidade, erosividade e de práticas conservacionista. A análise foi realizada por meio da Equação Universal da Perda de Solo Revisada (RUSLE), buscando identificar mudanças nos padrões de erosão ao longo do tempo. Os resultados indicam alterações morfológicas sutis e concentradas, com perda de solo nula a pequena, predominante em áreas de maior declividade. Além disso, a utilização da precipitação climatológica destacou a influência do relevo e do uso do solo nos padrões erosivos. Dessa forma, o estudo demonstra o potencial do uso de geoinformação e da RUSLE para o monitoramento de barragens de mineração.

Palavras-chave: Erosão do solo; Uso e cobertura do solo; Modelos digitais de elevação; Análise temporal.

INTRODUÇÃO

As barragens de mineração são estruturas projetadas para o controle, decantação e disposição de rejeitos ou sedimentos gerados pela atividade mineradora (BRASIL, 2022). Recentemente, dois desastres no estado de Minas Gerais elevaram a preocupação sobre a segurança dessas estruturas: Barragem de Fundão (2015) e Barragem I da mina Córrego do Feijão (2019).

Apesar de sua importância econômica, a atividade mineradora pode gerar impactos ambientais significativos, que vão além dos riscos de ruptura (SANTOS, 2018). As estruturas de rejeitos,

[1]Graduando do Curso de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, d2024004680@unifei.edu.br;
[2] Doutora pelo Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais - INPE, mariaalicemr@unifei.edu.br;
[3] Doutor pela Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, vsiqueira18@gmail.com;
[4] Professor Titular da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, arcilan@unifei.edu.br;

frequentemente construídas por meio de alteamentos que utilizam o próprio resíduo da mineração, apresentam maior vulnerabilidade, uma vez que sua estabilidade pode ser comprometida ao longo do tempo pela ausência de manutenção adequada e pela exposição a condições ambientais adversas, como chuvas intensas e tremores de terra (SILVA; ANASTÁCIO, 2024). Neste contexto, a Lei nº 14.066/2020 passou a proibir o alteamento a montante, método amplamente utilizado no país e associado a maiores riscos estruturais, exigindo a descaracterização dessas barragens.

A área de estudo corresponde à Barragem Vargem Grande, situada na Mina Abóboras, integrante do Complexo Vargem Grande (Nova Lima, MG). Localizada na cabeceira da bacia do Córrego Homônimo, a estrutura foi construída no ano de 2000 pela Mineração Brasileira Reunidas (MBR), com três alteamentos sucessivos pelo método a montante realizados entre 2003 e 2006. Originalmente, sua finalidade era a disposição de rejeitos das minas de Tamanduá, Capitão do Mato e Abóboras, além da reservação de água para a usina de beneficiamento. Com o esgotamento de sua capacidade em 2010, os rejeitos foram redirecionados para a Barragem Maravilhas II, mantendo-se na estrutura apenas descargas operacionais. Em fevereiro de 2019, a barragem teve sua Declaração de Condição de Estabilidade (DCE), documento técnico que atesta a segurança da estrutura perante os órgãos reguladores, negativada, atingindo o Nível de Emergência 1. Atualmente, a estrutura encontra-se em processo de descaracterização, iniciado em 2023; contudo, devido ao avanço das obras e à elaboração de um estudo sísmico local em 2024, a barragem recuperou a DCE positiva nos ciclos de revisão de 2025 (VALE, 2026).

A escolha da Barragem Vargem Grande como área de estudo justifica-se não apenas pela relevância das estruturas alteadas a montante no cenário de mineração de Minas Gerais, mas também pelas mudanças no uso e ocupação do solo ao longo do tempo na região. A comparação de imagens de satélite entre 2001 e 2014 (Figura 1) mostra alterações nítidas em um intervalo de 13 anos, diretamente associadas à expansão da atividade extrativista. De modo geral, observa-se no ano de 2001 houve uma área com menor grau de intervenção antrópica, enquanto na de 2014 há uma ampliação das áreas associadas à mineração, indicando mudanças significativas no uso e na cobertura do solo.

Além do uso de imagens de satélite, os Modelos Digitais de Elevação (MDE) permitem visualizar impactos no relevo, como erosões e alterações em encostas. A Figura 2 mostra mudanças morfológicas que ocorrem de forma pontual nas áreas destacadas. No entanto, o relevo nesses locais apresenta-se mais fragmentado, com novas marcas de erosão, evidenciando diferenças no relevo entre os períodos analisados. Nesse contexto, torna-se relevante investigar como essas alterações influenciam os resultados da Equação Universal de Perda de Solos Revisada (RUSLE), com o

objetivo de avaliar o potencial dos seus fatores como indicadores auxiliares do risco em barragens de rejeitos. A hipótese central é que o fator A (RUSLE) pode ser utilizado como um quantificador das mudanças no transporte de sedimentos decorrentes da ação da mineração.



Figura 1. Imagens de satélite da área da barragem Vargem Grande em 2001 e 2014, Nova Lima (MG). Fonte: Google Earth.

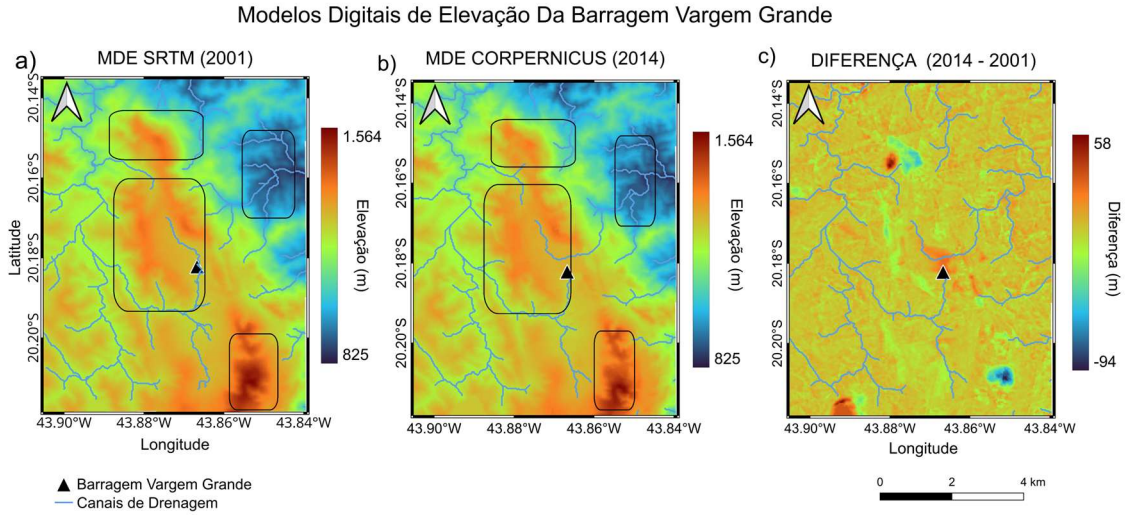

Figura 2. Modelos Digitais de Elevação (MDE) da área da Barragem Vargem Grande: a) MDE SRTM 2001; b) MDE Copernicus 2014; e c) diferença entre os MDE (2014–2001). Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

MATERIAIS E MÉTODOS

A estimativa da perda de solo foi realizada por meio da Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE), conforme apresentado por Campos e Cardoso (2004):

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

A perda de solo é expressa em toneladas por hectare por ano (t ha^{-1} ano^{-1}), onde R representa o fator de erosividade da chuva (MJ mm ha^{-1} h^{-1} ano^{-1}); K corresponde ao fator de erodibilidade do solo (t h MJ^{-1} mm^{-1}); LS é o fator de comprimento de rampa e declividade (adimensional); C representa o fator de uso e manejo do solo (adimensional); e P corresponde ao fator de práticas conservacionistas (adimensional).

Os dados para o cálculo dos fatores foram obtidos a partir de diferentes bancos de dados e metodologias. Os fatores R, LS e C foram estimados para dois períodos distintos (2001 e 2014), a fim de permitir a análise temporal das alterações na área de estudo. A síntese metodológica utilizada no estudo está apresentada na figura 3.

O fator R foi calculado a partir de dados de precipitação do conjunto de dados meteorológicos interpolados para o Brasil, disponibilizado por Xavier et al. (2022), para o período de 1991 a 2020. O índice de erosividade mensal (EI30) e o fator R foram obtidos por meio da aplicação do método proposto por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992), baseado no índice de Fournier (1960), conforme as Equações (2) e (3).

$$R = \sum_{i=1}^{12} Ei_{30} \quad (2)$$

$$EI_{3o_i} = 67{,}355 \left(\frac{r^2}{p}\right)^{0{,}85} \quad (3)$$

Onde EI30 corresponde ao índice de erosividade mensal (MJ mm ha^{-1} h^{-1}); r representa a precipitação média mensal (mm); p refere-se à precipitação média anual (mm); i indica o mês do ano; e n corresponde ao número de meses utilizados no cálculo.

O fator LS foi determinado a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDE), utilizando dados SRTM 30 m (2001) e Copernicus Global DSM 30 m (2014), conforme as metodologias propostas por McCool et al. (1987; 1989), Foster et al. (1977) e Desmet e Govers (1996), apresentadas nas Equações (4) e (5). Além disso, foi realizada a diferença entre os modelos digitais, visando identificar alterações entre os períodos.

$$L_{i,j} = \frac{(A_{i,j-in} + D^2)^{m+1} - A_{i,j-in}^{m+1}}{D^{\mathrm{m+2}} \cdot x_{i,j}^{m} \cdot (22{,}13)^{m}} \quad (4)$$

O L representa o fator de comprimento de rampa; Ai,j corresponde à área de contribuição (m²); Xi,j indica a direção de fluxo; D representa o tamanho do pixel (m); e m corresponde ao coeficiente dependente da declividade.

$$S = 10{,}8\ sen\ \theta_i + 0{,}03 \qquad \theta_i < 5{,}14° \qquad (5)$$
$$S = 16{,}8\ sen\ \theta_i - 0{,}50 \qquad \theta_i \geq 5{,}14°$$

Onde S representa o fator de declividade; θi corresponde ao ângulo de declividade da célula i (em graus); e 5,14° representa a declividade padrão da USLE, equivalente a 9%.

Os fatores C, P e K foram obtidos no IDE-SISEMA. O fator C foi determinado a partir de dados de uso e cobertura do solo, e o fator P, por meio do Potencial de Uso Conservacionista (PUC); ambos foram reclassificados conforme Wischmeier e Smith (1978). Já o fator K foi ajustado com base nas classes de erodibilidade e valores da base GeoInfo da EMBRAPA.

Após a obtenção de cada fator, eles foram integrados para a geração dos mapas de perda do solo com a precipitação anual de 2001 e 2014, e com a precipitação climatológica. Todos os dados foram padronizados para o sistema de referência SIRGAS 2000, zona 23S, ajustados quanto à resolução espacial e recortados para a área de estudo. O fator A foi classificado com base na FAO (1967). Além disso, foi calculada a variação percentual da perda de solo, utilizando a calculadora raster, por meio da diferença percentual entre os valores obtidos pelos índices A. Sendo calculado utilizando os resultados obtidos com a precipitação anual e outra com a precipitação climatológica.

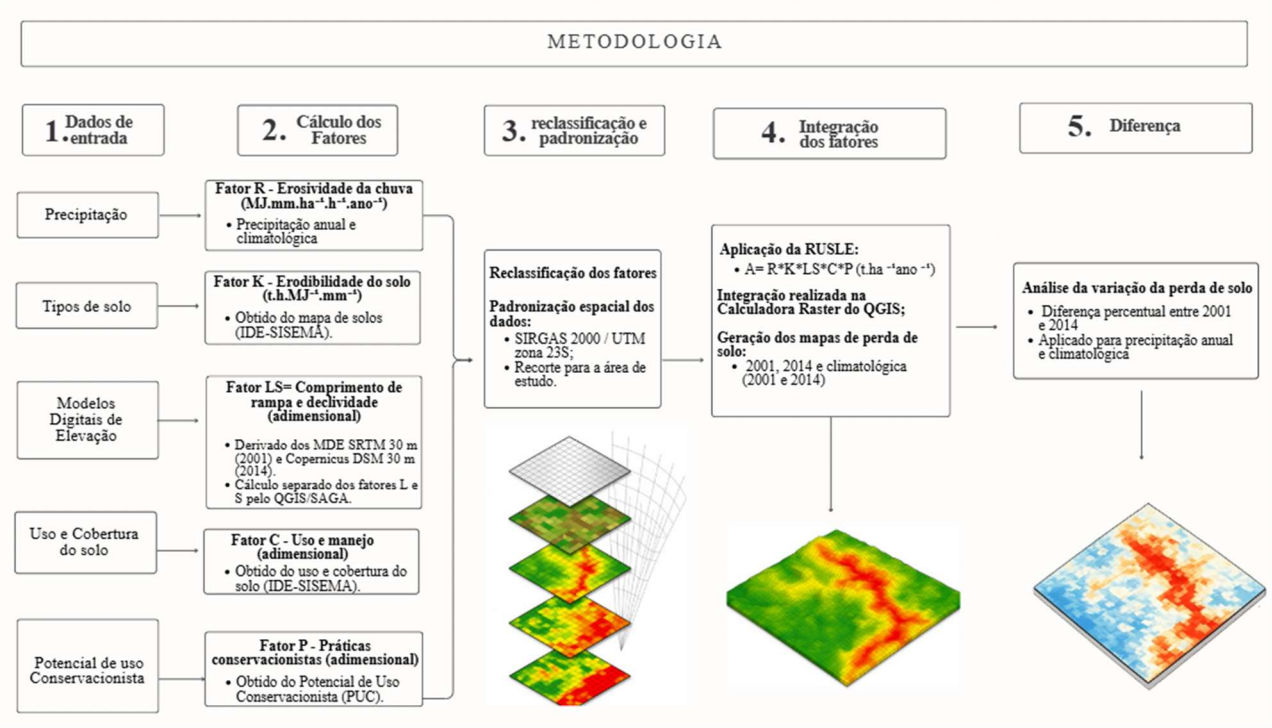

Figura 3. Fluxograma metodológico da aplicação da RUSLE para estimativa da perda de solo. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como resultado dos modelos digitais de elevação (Figura 2), observou-se que as alterações morfológicas foram sutis e concentradas em pontos específicos. Na Figura 2c, é possível observar que a área da barragem apresentou pequeno ganho de elevação, representado pelos tons em vermelho (58 m), enquanto outras áreas apresentaram redução de elevação, representadas pelos tons em azul (-94 m). Também foram observadas diferenças na representação dos canais de drenagem, principalmente no curso próximo à barragem, o que pode estar relacionado às diferenças de resolução e processamento dos MDEs no QGIS.

Em relação à perda de solo (Figura 4), observou-se que a maior parte da área apresentou classificação nula a pequena, correspondendo a perdas entre 0 e 10 t ha^{-1} ano^{-1}. As áreas com perda moderada (10 a 50 t $ha^{-1}ano^{-1}$) ocorreram de forma pontual, principalmente em regiões de maior declividade e próximas à área da barragem. Já as áreas com perda de solo forte, correspondentes a valores entre 50 e 200 t ha^{-1} ano^{-1}, concentraram-se em regiões específicas, também associadas às áreas de maior declividade.

Ao comparar os resultados do fator A utilizando a precipitação anual (Figuras 4a e 4b), observou-se que o ano de 2001 apresentou maior perda de solo em relação a 2014. As análises complementares, como as imagens de satélite, indicam que, em 2001, a área apresentava maior preservação da cobertura do solo. Esse comportamento pode estar associado ao fator R, já que nesse ano ocorreu maior volume de precipitação, influenciando o potencial erosivo da chuva e, consequentemente, os valores estimados pelo fator R. Isso demonstra que a precipitação anual teve influência significativa nos valores estimados de erosão.

Comparando os resultados utilizando a precipitação climatológica (Figuras 4c e 4d), observou-se maior área com perda de solo em 2014, principalmente nas regiões próximas à barragem e em áreas de maior declividade. Houve um aumento das áreas classificadas como moderadas, especialmente no cenário com fatores de 2014 (Figura 4d), indicando maior influência das alterações topográficas e da cobertura do solo quando reduzido o efeito da variabilidade anual da precipitação. A utilização da climatologia permitiu destacar a influência dos fatores, de uso e cobertura do solo (C) e comprimento de rampa e declividade (LS).

A Figura 5 apresenta a diferença percentual da perda de solo entre 2001 e 2014. Observa-se predominância de áreas com aumento da perda de solo, representadas pelos tons em vermelho (100%), indicando regiões que apresentaram maior degradação até 2014. Já as áreas em verde (-400%) representam redução da perda de solo ao longo dos anos, sugerindo locais com menor intensidade erosiva ou maior preservação da cobertura do solo.

Os resultados obtidos demonstram que a aplicação da RUSLE apresentou potencial para identificar áreas mais suscetíveis à erosão e representar a distribuição espacial da perda de solo na área de estudo. Os mapas de perda de solo mostraram resultados coerentes com as características de relevo, precipitação e cobertura do solo. Já os mapas de diferença percentual apresentaram resultados pouco quantitativos e mais qualitativos.

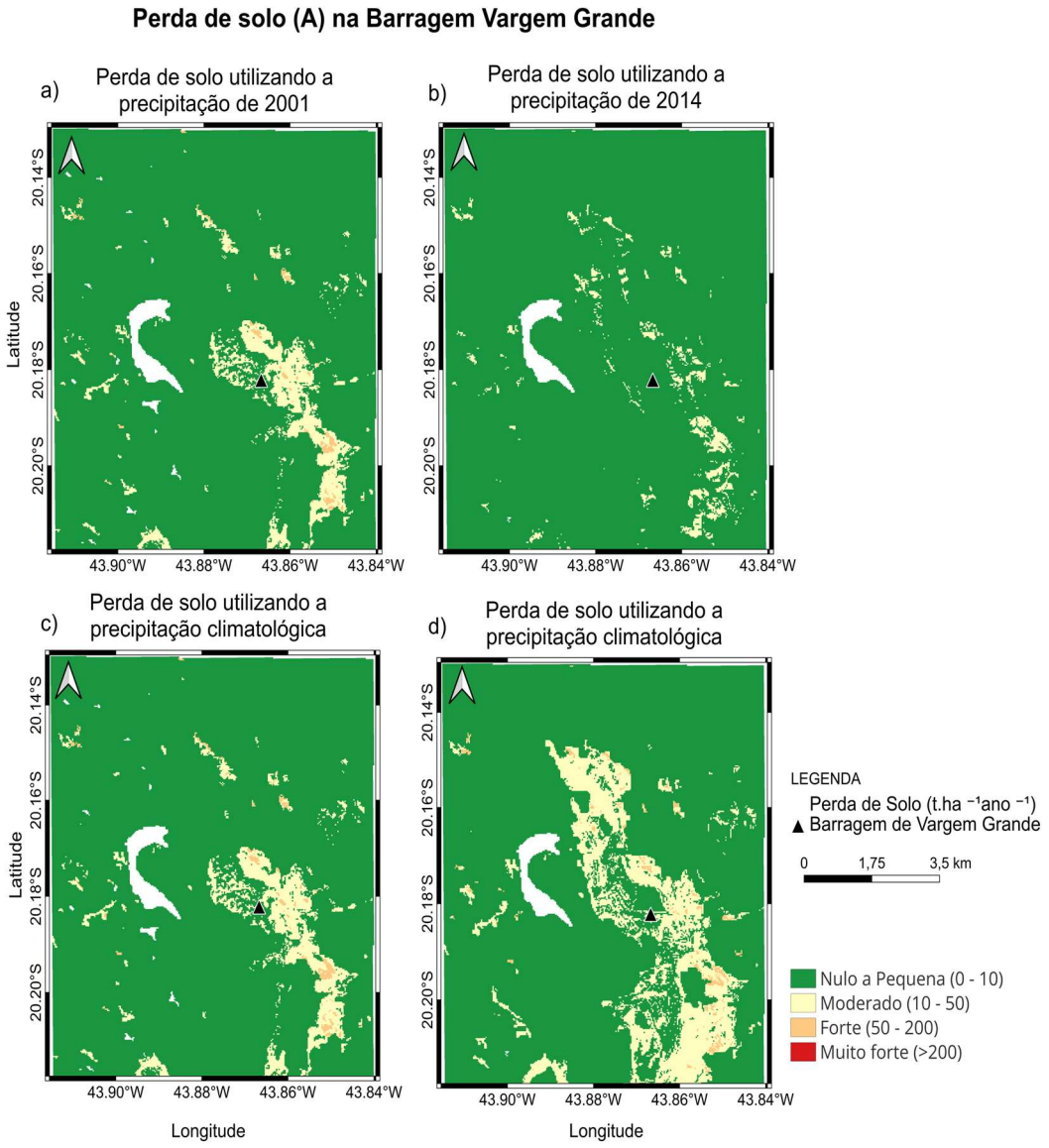

Figura 4. Mapas de perda de solo (fator A) obtidos pela RUSLE na Barragem Vargem Grande utilizando: a) fatores e precipitação de 2001; b) fatores e precipitação de 2014; c) fatores de 2001 com precipitação climatológica; e d) fatores de 2014 com precipitação climatológica. As áreas em branco correspondem a massas de água, onde a perda de solo não foi calculada. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

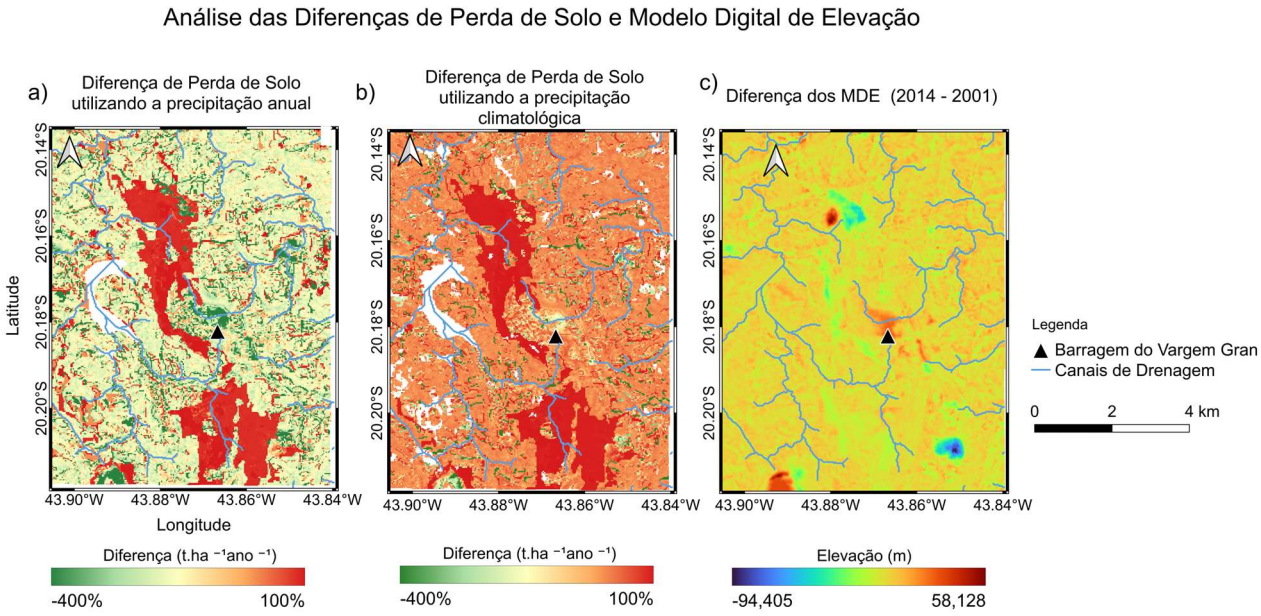

Figura 5. Diferença dos mapas de perda de solo (fator A) entre 2014 e 2001 utilizando: a) precipitação anual; b) precipitação climatológica; e c) diferença entre os Modelos Digitais de Elevação (2014–2001) na Barragem Vargem Grande. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

CONCLUSÕES E/OU CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos demonstraram que a aplicação da RUSLE permitiu identificar áreas mais suscetíveis à erosão e representar a distribuição espacial da perda de solo na área da Barragem Vargem Grande. De forma geral, predominou a classe de perda de solo nula a pequena, enquanto os maiores valores estiveram associados principalmente às áreas de maior declividade e próximas à barragem. A comparação entre os cenários de 2001 e 2014 evidenciou alterações relacionadas à precipitação, ao relevo e às mudanças no uso e cobertura do solo decorrentes da atividade mineradora.

A utilização da precipitação climatológica permitiu destacar com maior clareza a influência dos fatores topográficos e da cobertura do solo nos resultados estimados de erosão. Além disso, os Modelos Digitais de Elevação permitiram identificar alterações morfológicas pontuais ao longo do período analisado, principalmente nas áreas próximas à barragem e nos canais de drenagem.

Dessa forma, a hipótese proposta foi parcialmente confirmada, já que o fator A apresentou potencial para representar alterações relacionadas à erosividade e ao transporte de sedimentos. Os mapas de perda de solo se mostraram coerentes com as características locais, enquanto os mapas de diferença percentual apresentaram resultados mais qualitativos do que quantitativos, limitando análises mais precisas. Assim, o estudo demonstra o potencial da integração entre geoinformação e a RUSLE como ferramenta auxiliar no monitoramento ambiental de barragens de rejeitos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor, doutores e colegas pelo apoio durante a realização deste trabalho. Também agradeço a Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Centro Intersetorial de Pesquisas em Alterações Climáticas e Redução do Risco de Desastres (CIPARD) pelo apoio ao desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

CAMPOS, Sérgio Pascoal de; CARDOSO, Lincoln Gehring. Cálculo do fator LS da equação universal de perdas de solo. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 65-74, 2004. Disponível em: https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutoflorestal/wp-content/uploads/sites/234/2004/01/IF-c08.pdf. Acesso em: 22 abr. 2026.

CASTRO, Vinicius de; LANZA, Botelho; ELIZANGELA; et al. Aspectos legais relacionados a descaracterização de barragens alteadas a montante. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL**, 2. 2022. Disponível em: https://schenautomacao.com.br/cbge2022/envio/files/trabalho1_109.pdf. Acesso em: 22 abr. 2026.

DESMET, P. J. J.; GOVERS, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 51, n. 5, p. 427-433, 1996.

FERNANDEZ, C. et al. Estimating water erosion and sediment yield with GIS, RUSLE, and SEDD. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 58, n. 3, p. 129-131, 2003.

FOSTER, G. R.; MEYER, L. D.; ONSTAD, C. A. A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates. **Transactions of the ASAE**, v. 20, n. 4, p. 683-687, 1977.

GALDINO, Sérgio; WEILL, Mara de Andrade Marinho. Estimativa e análise do fator topográfico (LS) da Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE) para a bacia do Alto Taquari – MS/MT. In: **SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL**, 3., 2010, Cáceres. São José dos Campos: INPE, 2010. p. 260-269.

IDE-Sisema - Geoportal - SISEMA. Geoportal. Disponível em: https://geoportal.meioambiente.mg.gov.br/. Acesso em: 21 abr. 2026.

IMPRENSA NACIONAL. Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 159, n. 28, p. 45, 8 fev. 2022. Disponível em: https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-95-de-7-de-fevereiro-de-2022-380760962. Acesso em: 22 abr. 2026.

LACAZ, Francisco Antonio de Castro; PORTO, Marcelo Firpo de Sousa; PINHEIRO, Tarcísio Márcio Magalhães. Tragédias brasileiras contemporâneas: o caso do rompimento da barragem de rejeitos de Fundão/Samarco. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, São Paulo, v. 42, e5, 2017. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbso/a/5K38Dp8mVGv6jygHLGzPNGG/. Acesso em: 21 abr. 2026.

LEI Nº 14.066, DE 30 DE SETEMBRO DE 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 1º out. 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14066.htm. Acesso em: 21 abr. 2026.

MACHADO, Ana Carolina de Oliveira et al. A construção de barragens a montante: um estudo sobre os impactos, riscos e medidas de mitigação. **Caderno Pedagógico**, v. 19, n. 2, p. 1-18, 2022. Disponível em: https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/12812/7130. Acesso em: 22 abr. 2026.

MCCOOL, D. K.; FOSTER, G. R.; MUTCHLER, C. K.; MEYER, L. D. Revised slope length factor for the universal soil loss equation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 32, n. 5, p. 1571-1576, 1989.

VALE S.A. Barragem Vargem Grande. [Belo Horizonte], 2026. Disponível em: https://barragens.mpmg.mp.br/barragem-vargem-grande/. Acesso em: 22 abr. 2026. *(Nota: substitui VANESSAMP pelo autor institucional VALE)*

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Washington, DC: USDA, 1978. (Agriculture Handbook, n. 537).

XAVIER, A. C.; SCANLON, B. R.; KING, C. W.; ALVES, A. I. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 8390-8404, 2022. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.7731.