

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ZONAS DE ATENÇÃO HIDROSSEDIMENTAR NO MÉDIO PARAÓPEBA: APLICAÇÃO DO MODELO USPED PARA APOIO À REPARAÇÃO SOCIOAMBIENTAL

Hugo Henrique Cardoso de Salis¹

Abstract: Soil erosion and sediment deposition are intensified in watersheds affected by large-scale environmental disasters, such as the rupture of tailings dams. To support post-disaster rehabilitation strategies, this study proposes and applies the concept of Hydrosedimentary Attention Zones (ZAHS), aiming to identify areas of high erosive or depositional susceptibility. We applied the USPED (Unit Stream Power-based Erosion and Deposition) model in the Boa Vista watershed, a tributary of the Paraopeba River in the region impacted by the Brumadinho dam collapse (2019). Using 10-meter land use data (MapBiomass), a 30-meter resolution Digital Elevation Model, and erosion-related factors ($R = 7,418 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$; $K = 0.025$), the model estimated spatial patterns of sediment transport. Results indicated a predominance of low to moderate erosion and deposition, with severe erosion zones representing only 2.1% of the area but posing high environmental risk. We classified the ZAHS into low, medium, and high priority using statistical thresholds (5th and 95th percentiles) and natural breaks (Jenks method). The spatialization of these zones offers a replicable and technically robust tool to guide territorial decision-making and environmental recovery efforts. The methodology demonstrates the potential of USPED modeling, combined with GIS and remote sensing, as a low-cost and adaptable approach to identify sediment source and sink areas in degraded or at-risk watersheds.

Resumo: A erosão hídrica e a deposição de sedimentos são intensificadas em bacias hidrográficas impactadas por desastres ambientais, como o rompimento de barragens. Para apoiar estratégias de reparação ambiental, este estudo propõe e aplica o conceito de Zonas de Atenção Hidrossedimentar (ZAHS), visando identificar áreas com alta suscetibilidade à dinâmica erosiva e deposicional. A modelagem foi realizada com base no modelo USPED (Unit Stream Power-based Erosion and Deposition), aplicado na bacia do córrego Boa Vista, afluente do rio Paraopeba, região atingida pelo rompimento da barragem de Brumadinho em 2019. Utilizaram-se dados de uso e cobertura do solo do MapBiomass (resolução de 10 m) e Modelo Digital de Elevação (MDE) do Copernicus, originalmente com 30 metros de resolução, reinterpolado e hidrologicamente condicionado para 2 metros. Os resultados indicaram predomínio de processos leves, com zonas severas representando apenas 2,1% da área, mas com alto potencial de impacto ambiental. As ZAHS foram classificadas em três níveis (baixa, média e alta) com base em cortes estatísticos (5% e 95%) e quebras naturais. A abordagem demonstrou ser eficaz, acessível e replicável, fornecendo subsídios técnicos para a priorização de ações conservacionistas e de recuperação ambiental em bacias sob pressão antrópica intensa.

Palavras-Chave – Modelagem ambiental, Geoestatística, Mapeamento de processos erosivos

1) Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Belo Horizonte – MG, Brasil. E-mail: hugohcsalis@gmail.com ou hugohcs@ufmg.br

1. INTRODUÇÃO

A erosão hídrica, caracterizada pelo desprendimento, transporte e deposição de partículas do solo, resulta em perdas significativas de solo, nutrientes e matéria orgânica, comprometendo a produtividade agrícola e a segurança alimentar (Souza *et al.* (2020); Teixeira *et al.* (2022)). Em contextos de grandes crimes ambientais, como o rompimento de barragens de rejeitos, o problema se agrava exponencialmente, com a injeção massiva de rejeitos e contaminantes nos corpos hídricos, alterando drasticamente os ecossistemas fluviais e comprometendo o uso da água a longo prazo (Pacheco *et al.* (2022); Terêncio *et al.* (2023); Santana *et al.* (2023)).

Diante da complexidade e dos impactos da erosão hídrica, o mapeamento preciso de áreas críticas de erosão e deposição torna-se fundamental para um planejamento eficaz e para a implementação de estratégias de manejo sustentável (Djodjic e Markensten (2019)). Modelos matemáticos, como a Equação Universal de Perdas de Solo (USLE) e seus derivados, têm sido amplamente empregados para estimar a perda de solo (Wischmeier e Smith (1978); Ferro (2010); Benavidez *et al.* (2018); Borrelli *et al.* (2021)). Contudo, o modelo *Unit Stream Power Erosion and Deposition* (USPED) se destaca por sua capacidade de oferecer estimativas mais detalhadas e precisas da distribuição espacial da erosão e deposição. Ao incorporar a morfologia do relevo e os parâmetros do escoamento superficial, o USPED permite identificar especificamente as "fontes" (áreas de erosão) e as áreas de deposição de sedimentos, possibilitando uma alocação otimizada de práticas de conservação (Moore e Burch (1986); Mitasova *et al.* (1996); Domingues *et al.* (2020); Oliveira *et al.* (2022)).

As Zonas de Atenção Hidrossedimentar (ZAHS) são aqui propostas como uma abordagem conceitual e aplicada para identificar áreas prioritárias em bacias hidrográficas com alta suscetibilidade à dinâmica erosiva e deposicional. Embora dialoguem com conceitos já consolidados, como as áreas críticas de manejo (*critical source areas*) e regiões de perda de solo, as ZAHS se destacam por integrarem, de forma sistemática, a modelagem espacial de processos hidrossedimentares com critérios de magnitude e conectividade morfo-hidrológica. Além disso, apresentam uma tipologia voltada à tomada de decisão territorial em cenários de degradação ambiental severa — como demonstrado por Santana *et al.* (2022), que modelaram a erosão e deposição de sedimentos com o USPED na bacia do rio Turvo, afluente do rio Doce, por sua vez, impactado pelos rejeitos do rompimento da barragem em Mariana, em 2015.

Ao considerar simultaneamente o potencial de produção e de deposição de sedimentos, o conceito de ZAHS amplia a aplicabilidade de modelos como o USPED, oferecendo uma ferramenta replicável e adaptável à realidade de áreas impactadas por desastres ou submetidas a pressão antrópica intensa. Sua operacionalização, ancorada em dados de sensoriamento remoto, sistemas de informação geográfica e estatísticas espaciais, busca não apenas mapear áreas vulneráveis, mas também fornecer subsídios técnicos para ações de recuperação, conservação e alocação de recursos ambientais de forma mais estratégica.

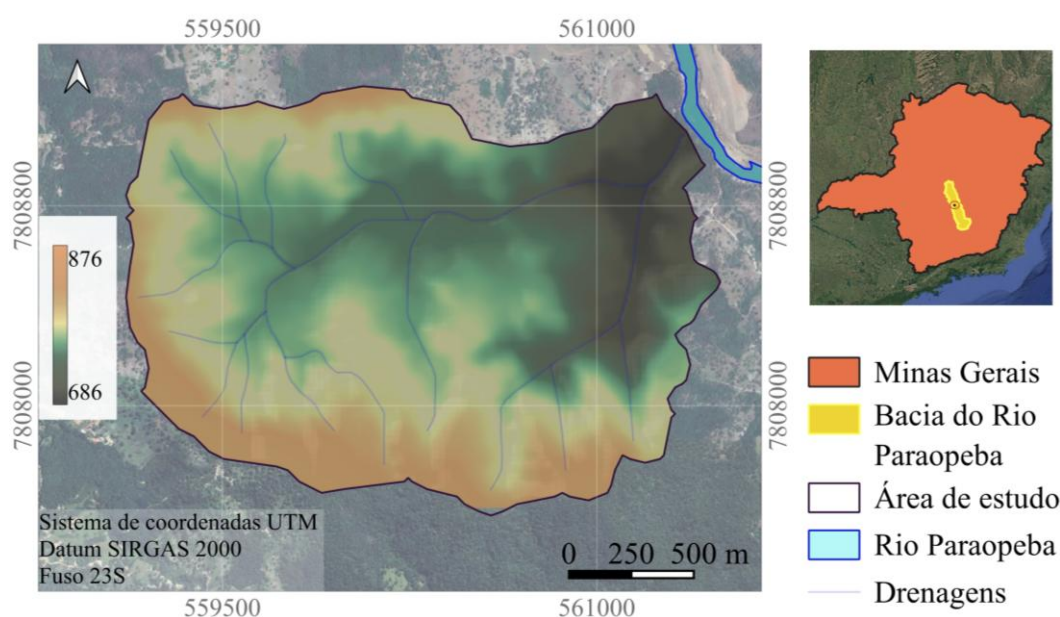
Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo aplicar o modelo USPED para identificar e categorizar Zonas de Atenção Hidrossedimentar (ZAHS) em uma pequena bacia afluente do rio Paraopeba que foi região severamente impactada pelo rompimento da barragem da Vale em Brumadinho em 2019.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo abrange a bacia hidrográfica do córrego Boa Vista, situada no município de Florestal, na região central do estado de Minas Gerais, inserida na bacia do rio Paraopeba (Figura 1). Com uma área aproximada de 322,45 hectares, a bacia apresenta altitudes variando entre 686 e 876 metros e predominância de relevo suavemente ondulado.

Figura 1 - Mapa de Localização da Área de Estudo



Os solos existentes na área são classificados como Argissolos Vermelho-Amarelos, os quais possuem moderada a alta suscetibilidade à erosão hídrica. A cobertura do solo é majoritariamente composta por áreas de vegetação florestal (63,3%) e atividades agropecuárias (36,3%), com pequenas porções de vegetação herbácea e áreas antrópicas não vegetadas, segundo classificação da Plataforma Mapbiomas do ano de 2023. O valor anual de erosividade na região totaliza $7.418 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (NetErosividade – MG: Moreira *et al.* (2008)) com maior concentração nos meses de dezembro a fevereiro, refletindo a sazonalidade marcada do clima tropical típico da região.

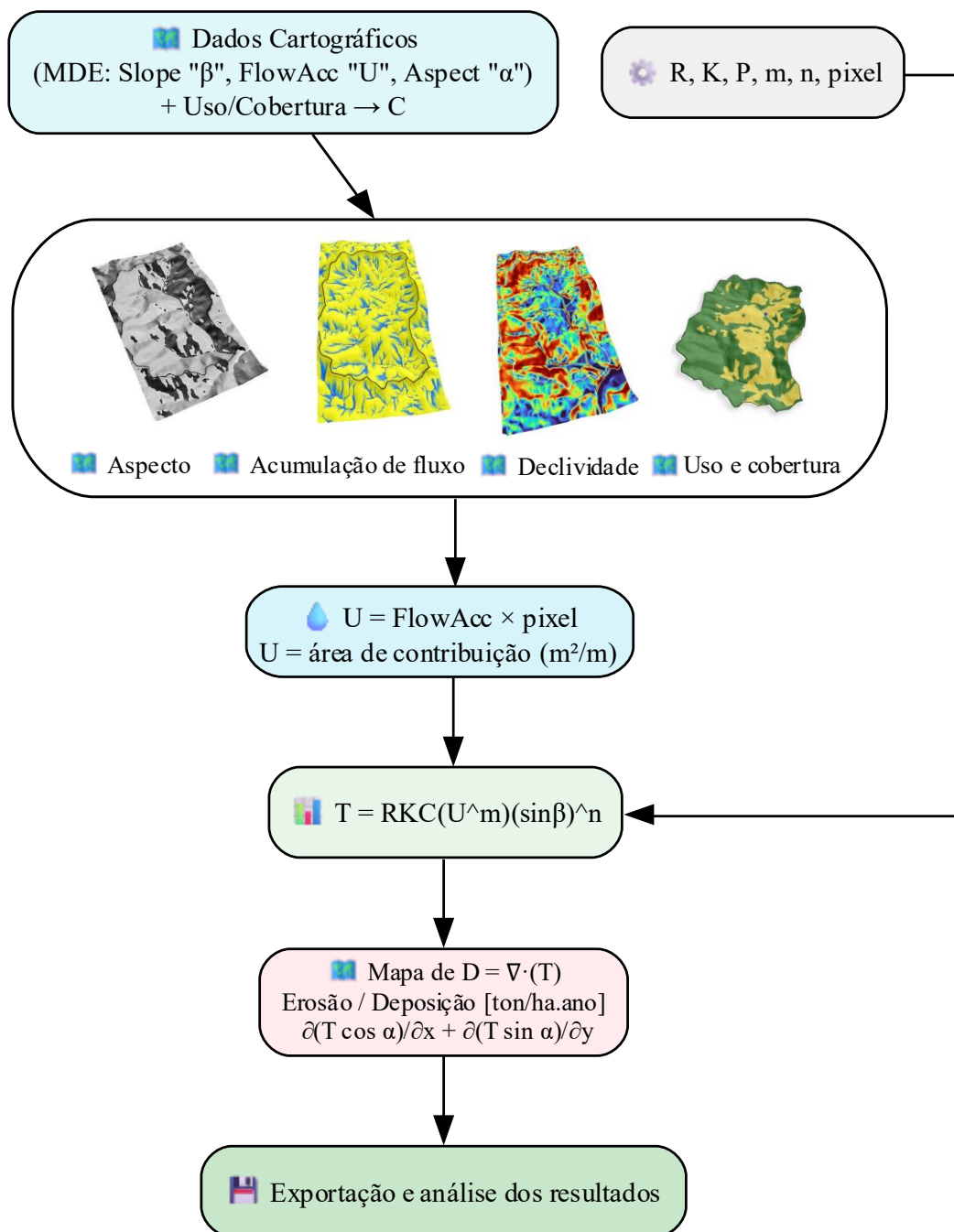
2.2. MATERIAIS

A modelagem foi realizada na linguagem R, com os pacotes “sf”, “terra” e “dplyr”. Os dados utilizados incluem: a) raster de uso e cobertura do solo obtidos da plataforma Mapbiomas, com resolução espacial de 10m; b) arquivos rasters derivados do Modelo Digital de Elevação (MDE) do Copernicus, com resolução de 30 metros, previamente pré-processados e hidrologicamente condicionados e reinterpolado para 2 metros. Foram utilizadas as informações de declividade (*Slope*), acumulação de fluxo (*Flow Accumulation*) e orientação da declividade (*Aspect*), todas processadas por meio do GRASS GIS dentro do ambiente QGIS.

2.3. ETAPAS METODOLÓGICAS

As etapas para cálculo da erosão e deposição foram conduzidas conforme o modelo USPED (*Unit Stream Power-based Erosion and Deposition*), representado no fluxograma da Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma metodológico para estimativa de erosão e deposição com base no modelo USPED



O fator C foi atribuído com base nas classes de uso e cobertura, utilizando os seguintes valores: floresta (0.001), vegetação herbácea/arbustiva (0.15), agropecuária (0.30), área não vegetada (0.80), água (0.0001). Os parâmetros adotados no modelo foram: $R = 7.418 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, $K = 0.025$ (referente a classe de solos do tipo Argissolo Vermelho-Amarelo), $P = 1.0$, $m = 1.3$, $n = 1.1$, e resolução espacial (*pixelSize*) de 2 metros.

O transporte de sedimentos (T) foi calculado pela equação $T = RKC (U^m) (\sin\beta)^n$, onde U representa a área de contribuição ($\text{FlowAcc} \times \text{pixel}$), e β a declividade em radianos. A divergência de T foi obtida a partir das derivadas parciais em x e y das componentes $T \cos \alpha$ e $T \sin \alpha$, onde α é o aspecto convertido para radianos. O raster resultante da divergência (D), representando a distribuição

espacial da erosão (valores positivos) e deposição (valores negativos), foi exportado em formato .tif e visualizado com paleta divergente para facilitar a interpretação.

2.3.1 DELIMITAÇÃO DAS ZONAS DE ATENÇÃO HIDROSSEDIMENTAR

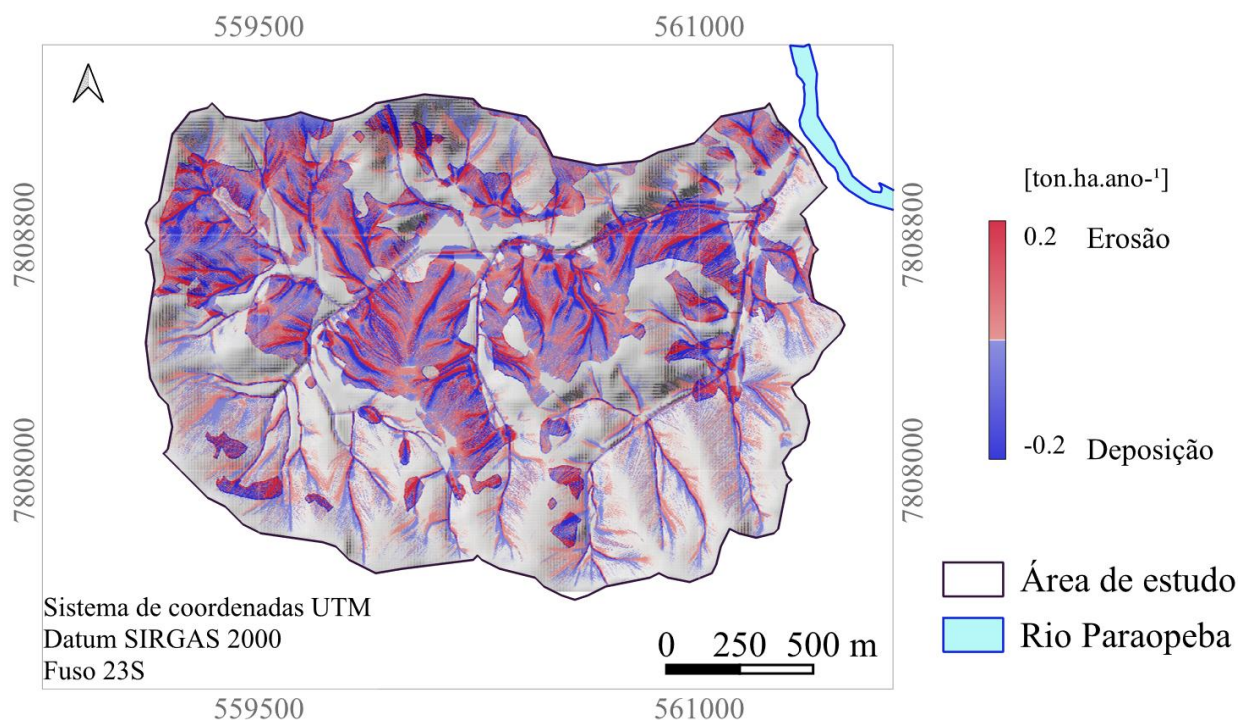
Para a delimitação das Zonas de Atenção Hidrossedimentar (ZAHS), foram consideradas exclusivamente as áreas com valores extremos do raster de D, representando os processos de erosão severa e deposição severa. Essas classes foram selecionadas com base em corte estatístico cumulativo acima dos percentis 5% e 95%. Utilizou-se o método de quebras naturais (Jenks) para classificar as manchas vetoriais. Esse método agrupa automaticamente os valores de área em classes que minimizam a variância interna e maximizam a variância entre classes, resultando em três categorias de Zonas de Atenção Hidrossedimentar (ZAHS): baixa, média e alta atenção. Essa abordagem permitiu considerar simultaneamente a intensidade do processo erosivo ou deposicional e a magnitude espacial das feições, culminando em um mapa temático de ZAHS que oferece suporte técnico à gestão adaptativa e às ações de mitigação e reparação ambiental.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 RESULTADOS

A aplicação do modelo USPED na bacia do córrego Boa Vista indicou uma média de erosão de $0,064 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ e uma média de deposição de $0,065 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Mapa da espacialização da taxa de erosão e deposição estimada pelo modelo USPED na bacia do Córrego Boa Vista.



A Tabela 1 resume a distribuição das áreas nas quatro classes definidas a partir do saldo erosivo: erosão leve (48,3%), deposição leve (42,5%), deposição severa (7,1%) e erosão severa (2,1%). A

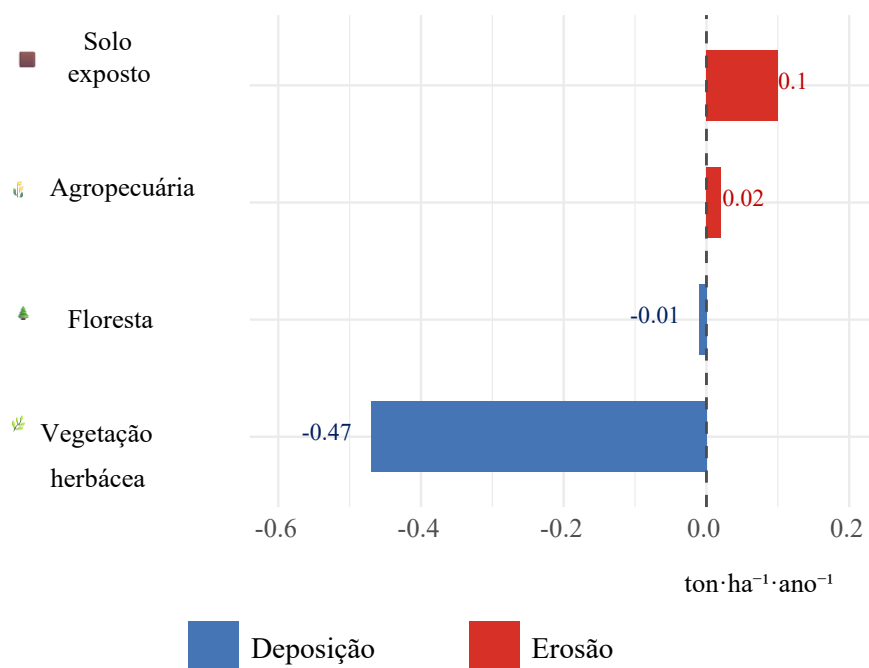
espacialização dos dados possibilitou a identificação de zonas críticas (ZAHS), representadas logo mais adiante na Figura 5, destacando-se áreas com acúmulo ou perda significativa de solo.

Tabela 1 - Distribuição da área por classes de erosão e deposição modeladas pelo USPED na bacia do córrego Boa Vista.

Classe	Área (ha)	%
Deposição Severa (< -0.1)	22,8	7,1
Deposição Leve (-0.1 a 0)	137,0	42,5
Erosão Leve (0 a 0.5)	155,8	48,3
Erosão Severa (> 0.5)	6,9	2,1
Total	322,5	100

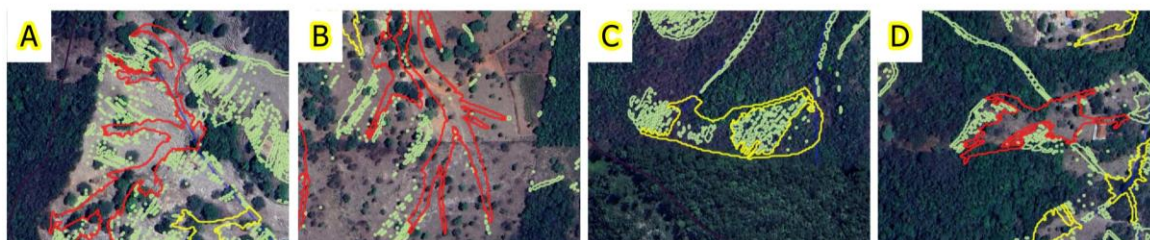
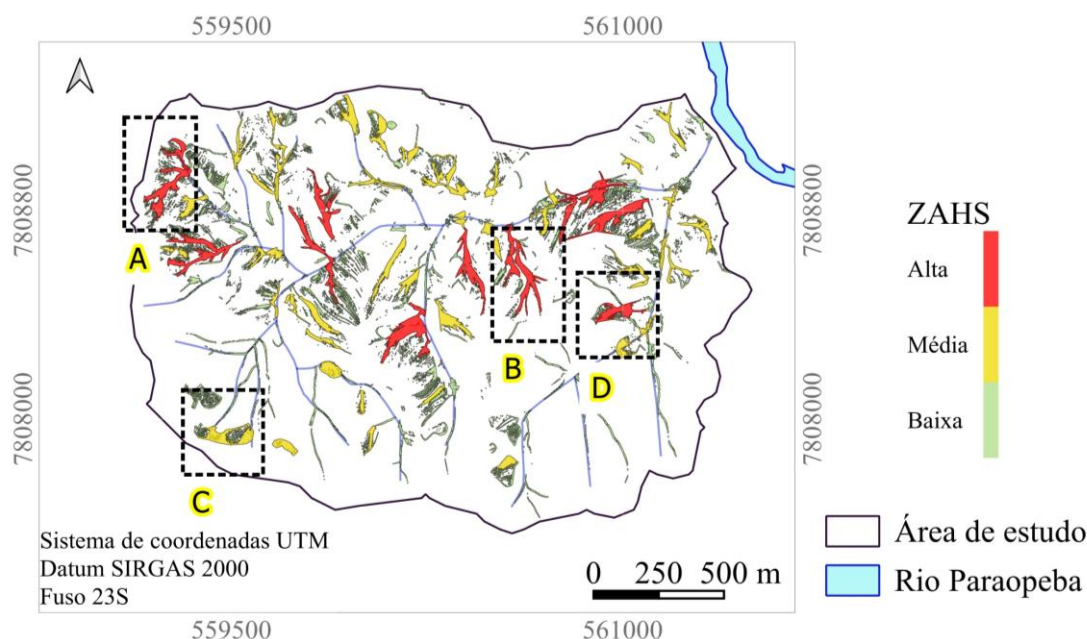
A análise do balanço médio de sedimentos ($\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$) por classe de uso e cobertura do solo (Figura 4) revelou padrões distintos de contribuição aos processos hidrossedimentares. A classe "Solo exposto" apresentou o maior valor médio de erosão, com $0,10 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, seguida pela "Agropecuária" com $0,02 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, evidenciando seu papel como fontes significativas de sedimentos. Por outro lado, as áreas de "Vegetação herbácea" e "Floresta" atuaram como pontos de retenção de sedimentos, com saldos negativos de $0,47$ e $0,01 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, respectivamente.

Figura 4 - Balanço médio de erosão e deposição por uso do solo na bacia do Córrego Boa Vista



As ZAHS foram divididas em três classes: baixa (0–0,11 ha), média (0,11–0,49 ha) e alta (0,49–1,14 ha), conforme ilustrado na legenda. Essa classificação permitiu identificar e priorizar manchas críticas para ações de recuperação, destacando-se especialmente as ZAHs de classe alta, com potencial impacto significativo e imediato sobre a dinâmica sedimentar da área de estudo.

Figura 5 - Zonas de Atenção Hidrossedimentar na Bacia do Córrego Boa Vista



As ZAHs classificadas como baixa atenção (0 a 0,11 ha) representaram a maior proporção da área total, somando 10,3 ha (35,4%). As ZAHs de prioridade média (0,11 a 0,49 ha) totalizaram 9,83 ha (33,8%), enquanto as ZAHs de alta prioridade (0,49 a 1,14 ha) corresponderam a 8,98 ha (30,8%). Embora as manchas de classe alta ocupem uma área ligeiramente inferior, concentram maior potencial de impacto por unidade de área, sendo, portanto, estratégicas para ações de controle e mitigação. Já as classes baixa e média, por sua frequência e distribuição na paisagem, indicam a necessidade de estratégias mais difusas de manejo conservacionista e restauração ambiental.

3.2 DISCUSSÕES

Os resultados obtidos revelam uma bacia com predominância de processos hidrossedimentares de baixa a moderada intensidade, com a maior parte da área concentrada nas classes de deposição leve e erosão leve. Ainda que as zonas severas ocupem uma menor extensão, sua ocorrência pontual, sobretudo em áreas agropecuárias, demanda atenção especial, tanto por seu potencial de contribuição ao assoreamento quanto por sua suscetibilidade à degradação acelerada do solo.

As tendências observadas são coerentes com estudos prévios, como os de Chen et al. (2022) e Minervino Amodio et al. (2023), que destacam o papel das áreas agrícolas como fontes expressivas de sedimentos. De modo complementar, os resultados também confirmam o papel das formações florestais como zonas de retenção, atuando como amortecedores naturais, em consonância com os trabalhos de Macedo et al. (2016) e Roy et al. (2020). A espacialização das ZAHS permite integrar a

modelagem com o planejamento ambiental, favorecendo a priorização de práticas conservacionistas e de restauração com base em evidências técnicas.

3.3 POTENCIAIS E LIMITAÇÕES

O modelo USPED mostrou-se uma ferramenta eficaz e acessível para identificar áreas com tendência à perda ou acúmulo de sedimentos, especialmente em bacias com relevo suave e uso agropecuário intensivo. A possibilidade de integrar diferentes fontes de dados — como uso do solo, relevo e atributos do solo — torna sua aplicação flexível e replicável em diversos contextos. Um ponto de destaque foi a coerência visual dos resultados com a paisagem real, verificada por meio da comparação com imagens de alta resolução disponíveis no *Google Earth*, o que reforça a confiabilidade da modelagem mesmo na ausência de dados de campo.

Apesar dos avanços, é importante reconhecer que o modelo depende da qualidade dos dados de entrada, especialmente do MDE e da representação do fator C. Além disso, a ausência de campanhas de campo limita a validação quantitativa dos resultados. Para fortalecer o uso do USPED como apoio à tomada de decisão, recomenda-se que estudos futuros incorporem medições em campo e monitoramento pontual, o que permitirá calibrar e ajustar os parâmetros conforme a realidade local. Ainda assim, os resultados obtidos demonstram o potencial do modelo como ferramenta estratégica para orientar ações de conservação, planejamento ambiental e reparação de áreas degradadas, contribuindo para sua adoção mais ampla em políticas públicas e iniciativas técnicas voltadas à gestão ambiental e social do território.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação do modelo USPED permitiu identificar zonas críticas de erosão e deposição na bacia do córrego Boa Vista, com destaque para áreas de erosão severa que, embora representem apenas 2,1% da área total, concentram alto potencial de impacto ambiental. A delimitação das Zonas de Atenção Hidrossedimentar (ZAHS) mostrou-se eficaz para orientar intervenções prioritárias.

A coerência visual dos resultados com a paisagem real, verificada por meio de imagens de alta resolução, reforça a confiabilidade da modelagem. O modelo se destaca como ferramenta acessível e replicável, com potencial para subsidiar a alocação estratégica de recursos em ações de conservação e reparação ambiental.

Como limitação, destaca-se a ausência de validação em campo e a sensibilidade à qualidade dos dados de entrada. Recomenda-se que trabalhos futuros incluam campanhas de campo, séries temporais e cenários de mudança no uso do solo, fortalecendo o uso do USPED como base técnica para decisões ambientais em áreas impactadas

5. REFERÊNCIAS

- BENAVIDEZ, R.; JACKSON, B.; MAXWELL, D.; NORTON, K. (2018). “*A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): With a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates*”. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), pp. 6059–6086.
- BORRELLI, P.; ALEWELL, C.; ALVAREZ, P.; ANACHE, J.A.A.; BAARTMAN, J.; BALLABIO, C.; PANAGOS, P. (2021). “Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis”. *Science of the Total Environment*, 780, pp. 146494.

- DJODJIC, F.; MARKENSTEN, H. (2019). “*From single fields to river basins: Identification of critical source areas for erosion and phosphorus losses at high resolution*”. *Ambio*, 48(10), pp. 1129–1142.
- DOMINGUES, G.F.; MARCATTI, G.E.; SANTOS, A.G.; LORENZON, A.S.; ALMEIDA TELLES, L.A.; CASTRO, N.L.M.; RIBEIRO, C.A.A.S. (2020). “*Optimized allocation of forest restoration zones to minimize soil losses in watersheds*”. *Journal of Environmental Management*, 271, pp. 110923.
- FERRO, V. (2010). “*Deducing the USLE mathematical structure by dimensional analysis and self-similarity theory*”. *Biosystems Engineering*, 106(2), pp. 216–220.
- MITASOVA, H.; HOFIERKA, J.; ZLOCHA, M.; IVERSON, L.R. (1996). “*Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS*”. *International Journal of Geographical Information Systems*, 10(5), pp. 629–641.
- MOORE, I.D.; BURCH, G.J. (1986). “*Modelling erosion and deposition: topographic effects*”. *Transactions of the ASAE*, 29(6), pp. 1624–1630
- MOREIRA, M.C.; PRUSKI, F.F.; OLIVEIRA, T.E.C.; PINTO, F.A.C.C.; SILVA, D.D. (2008). “*NETEROSIVIDADE MG: Erosividade da chuva em Minas Gerais*”. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, pp. 1349–1353
- OLIVEIRA, A.H.; KLINKE NETO, G.; PEREIRA, S.Y. (2022). “*Estimativa da erosão e deposição pela Unit Stream Power Erosion and Deposition em uma sub-bacia às margens do Rio Mogi Guaçu, município de Mogi Guaçu, São Paulo, Brasil*”. *Geologia USP, Série Científica*, 22(1), pp. 77–92.
- PACHECO, F.A.L.; VALLE JUNIOR, R.F.; MELO, M.M.A.P.; PISSARRA, T.C.T.; MELO, M.C.; VALERA, C.A.; FERNANDES, L.F.S. (2022). “*Prognosis of metal concentrations in sediments and water of Paraopeba River following the collapse of B1 tailings dam in Brumadinho (Minas Gerais, Brazil)*”. *Science of The Total Environment*, 809, pp. 151157.
- SANTANA, R.N.; SILVA, L.M.A.L.; COSTA MENEZES, S.J.M.; DOMINGUES, G.F.; RIBEIRO, C.A.A.S.; SANTOS, A.R. (2022). “*Mapeamento da erosão e deposição de sedimento dentro da bacia hidrográfica do rio Turvo - MG*” in *Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Foz do Iguaçu – PR, ABRH, Nov. 2022.
- SOUZA, E.D.O.; COSTA, M.D.S.; OLIVEIRA, J.F.D.; GOIS, G.D.; MARIANO, G.L.; COSTA, C.E.D.S.; SANTIAGO, D.D.B. (2020). “*Estimativa e espacialização da erosividade em mesorregiões climáticas no estado de Alagoas*”. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35(spe), pp. 769–783.
- TEIXEIRA, D.B.S.; CECÍLIO, R.A.; MOREIRA, M.C.; PIRES, G.F.; FERNANDES FILHO, E.I. (2022). “*Recent advancements in rainfall erosivity assessment in Brazil: A review*”. *Catena*, 219, pp. 106572.
- TERÊNCIO, D.P.S.; PACHECO, F.A.L.; VALLE JUNIOR, R.F.; MELO, M.M.A.P.; PISSARRA, T.C.T.; MELO, M.C.; FERNANDES, L.F.S. (2023). “*The Igarapé Weir decelerated transport of contaminated sediment in the Paraopeba River after the failure of the B1 tailings dam (Brumadinho)*”. *International Journal of Sediment Research*, 38(5), pp. 673–697.
- WISCHMEIER, W.H. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. USDA Agriculture Handbook, 537. Washington, D.C.