



USO DE MODELO HIDROLÓGICO PARA DEFINIÇÃO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS DE REFLORESTAMENTO NO ENTORNO DE UM RESERVATÓRIO DE CRISE HÍDRICA

Diogo Olivetti ¹
Clibson Alves dos Santos ²
Alexandre de Oliveira Soares ³
Allana Paula Braga ⁴

RESUMO

O reservatório de Furnas tem passado por uma crise hídrica na última década que tem gerado um cenário de insegurança hídrica, marcado principalmente por conflito de uso da água. Este cenário traz a necessidade de medidas de revitalização de bacias hidrográficas tributárias. Cabe saber quais são as áreas prioritárias para ações de revitalização. Os modelos de perda de solo têm a capacidade de avaliar quais bacia hidrográficas e áreas específicas são mais críticas na produção de sedimento. Juntamente, é possível criar cenários temporais de modo a diagnosticar o processo de degradação de bacias ao longo do tempo e demonstrar como futuros manejos, em locais estratégicos, podem promover a integração da paisagem. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi de realizar um diagnóstico em bacias hidrográficas afluentes do braço sudoeste do reservatório de Furnas. Para tanto foi aplicado o modelo hidrológico InVEST-SDR com ênfase na comparação entre o cenário atual de uso e cobertura do solo e um cenário simulado com todas as Áreas de Preservação Permanente florestadas. Os resultados indicam uma redução significativa nas taxas de perda de solo no cenário simulado. Entretanto, foram identificadas limitações relevantes, como a baixa resolução de alguns dados de entrada e a simplificação de certos parâmetros. Diante disso, o estudo recomenda o aprimoramento dos dados utilizados na modelagem e a incorporação de modelos mais abrangentes ou mesmo outras vertentes do próprio InVEST, capazes de integrar a dinâmica da produção hídrica e dos serviços ecossistêmicos. Essa abordagem pode ampliar o potencial de suporte à tomada de decisão em estratégias de conservação e manejo sustentável de bacias hidrográficas.

INTRODUÇÃO

O reservatório de Furnas representa uma das maiores e mais significativas estruturas hídricas do Brasil. Sua criação remonta à década de 1960, primordialmente pelo propósito de geração de energia elétrica. Contudo, é importante destacar que também

¹ Professor visitante do Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGEO) da Universidade Federal de Alfenas- MG (UNIFAL-MG), diogo.olivetti@unifal-mg.edu.br;

² Professor titular da Universidade Federal de Alfenas- MG, clibson@unifal-mg.edu.br;

³ Mestrando do PPGEO da Universidade Federal de Alfenas- MG; alexandre.soares@sou.unifal-mg.edu.br

⁴ Mestranda do PPGEO da Universidade Federal de Alfenas- MG, allana.braga@sou.unifal-mg.edu.br;



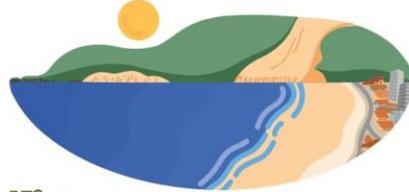
desempenha um papel crucial no contexto do uso múltiplo da água, para diversos setores e atividades, tal como o abastecimento para consumo humano, irrigação agrícola, piscicultura e serve como cenário para a prática de recreação e lazer, constituindo um destino turístico relevante (JORGE GODOY, 2017).

O reservatório de Furnas tem passado por uma crise hidroenergética na última década. Com exceção de 2022, de 2012 até o momento atual vem ocorrendo déficit em seu armazenamento de água. Essa crise tem gerado um cenário de insegurança hídrica, marcado principalmente por conflito de uso da água entre os setores de turismo e geração de energia elétrica (ANA, 2023).

Este cenário traz a necessidade de medidas de revitalização de bacias hidrográficas tributárias. Dentre essas medidas, o reflorestamento de áreas estratégicas é uma realidade que já vem sendo provada sua eficiência como um sistema “produtor de água” que promove aumento nas vazões de bacias hidrográficas (VIANI et al., 2019). Tal medida é uma das diretrizes de programas e planos nacionais de Revitalização de Bacias Hidrográficas (MDR, 2021) e do Plano de Recuperação dos Reservatórios de Regularização de Usinas Hidrelétricas do País (MME, 2022).

Sabendo que planos de reflorestamento são eficientes para revitalização de bacias hidrográficas, cabe diagnosticar qual área é prioritária para tal ação, que trará um retorno mais eficiente para a recarga de vazão. Para este questionamento, as ferramentas de geotecnologias podem ser soluções para definições de áreas estratégicas. Cabe destaque para a modelagem de bacias hidrográficas que tem a capacidade de avaliar qual bacia hidrográfica é mais crítica na produção de sedimento e recarga de vazão. Juntamente, é possível criar cenários temporais, do passado e futuro, de modo a diagnosticar o processo de degradação de bacias ao longo do tempo e como futuras intervenções, em locais estratégicos, podem promover a da integração da paisagem (KETEMA; DWARAKISH, 2019).

O modelo de erosão hídrica mais convencional é a Universal Soil Loss Equation (USLE) que foi consolidada por Wischmeier e Smith (1978) e revisada (RUSLE) por RENARD et al., (1997), posteriormente diversos outros modelos foram sendo desenvolvidos (IGWE et al., 2017). Como exemplo, o InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) é uma plataforma de modelagem espacialmente explícita, de código aberto e uso gratuito (SHARP et al., 2020). Seu propósito central é quantificar, mapear e valorar serviços ecossistêmicos fornecidos por ambientes naturais,



15º SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA

permitindo a avaliação dos benefícios e trade-offs associados a diferentes cenários de uso da terra e práticas de manejo.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi realizar um diagnóstico de perda de solos em cenário real e simulado, considerando as áreas de APP florestadas, em nove bacias hidrográficas afluentes do braço sudoeste do reservatório de Furnas, por meio do modelo InVEST, usando a vertente SDR.

METODOLOGIA

A área de estudo compreende um conjunto de nove bacias hidrográficas que são diretamente tributárias dos braços sudoeste (Rios Sapucaí e Peixe) do reservatório de Furnas (Figura 1). O clima, de acordo com a classificação de Köppen, é o Tropical Mesotérmico (CwB) com precipitação média anual de 1.500 mm. Os demais aspectos físicos da área de estudo serão apresentados ao decorrer deste tópico.

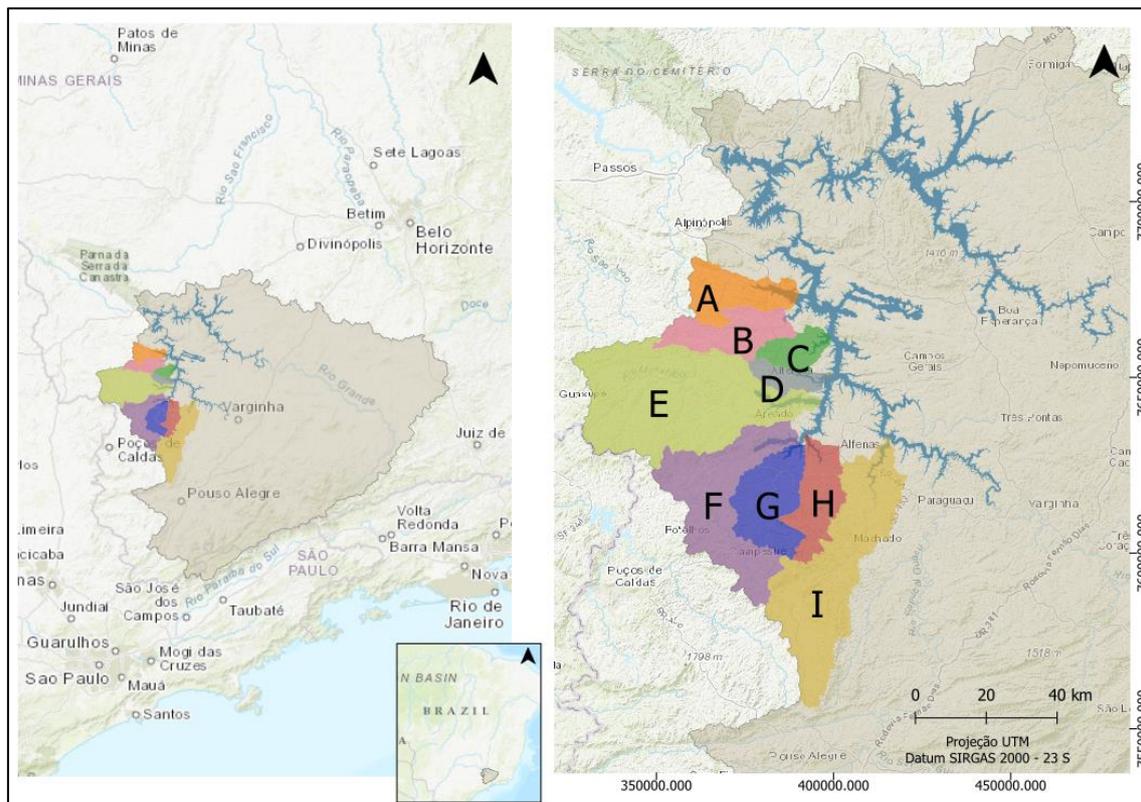
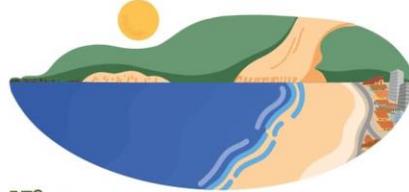


Figura 1: Mapa de localização que apresenta toda a bacia do reservatório de Furnas e destaca as nove bacias tributárias do braço do sudoeste que foram escolhidas para o estudo. No intuito de facilitar a comunicação, foi decidido classificá-las de A a I.



15º SIMPÓSIO NACIONAL DE
GEOMORFOLOGIA

O software InVEST (3.16.0) foi aplicado para estimar a perda de solo e taxas de sedimentação na área de Estudo. Para tanto, foi aplicada a vertente Sediment Delivery Ratio (SDR) que basicamente é a aplicação do tradicional modelo RUSLE junto com o SDR (Figura 2).

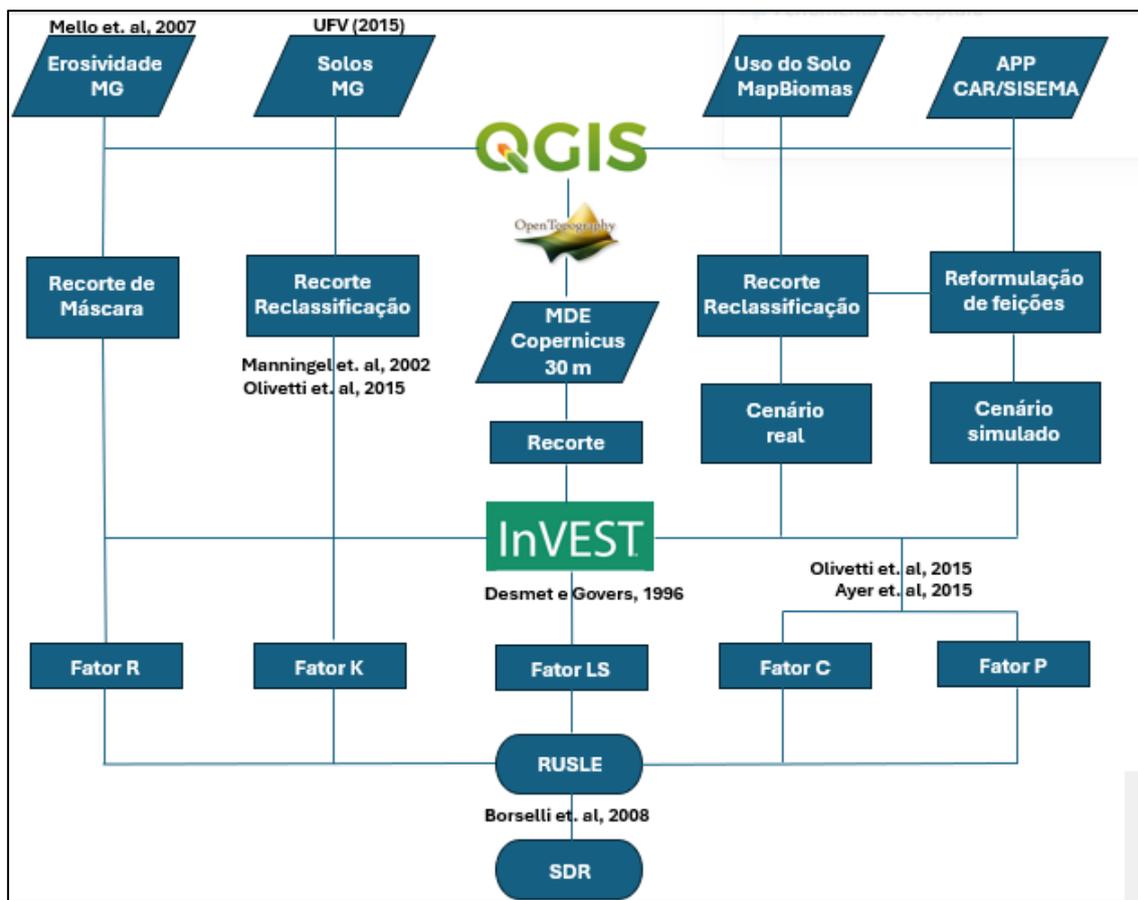


Figura 2: Fluxograma metodológico para a aplicação da vertente SDR no InVEST

O modelo RUSLE é definido pela seguinte equação 1:

$$A: R * K * LS * C * P \quad (1)$$

Em que: A = perda de solo média anual, em $t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$; R = fator erosividade da chuva, em $MJ \text{ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$; K = fator erodibilidade do solo, em $t \text{ h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$; LS = fator topográfico, adimensional; C = fator uso e manejo do solo, adimensional; P = fator práticas conservacionistas, adimensional.



O Fator R foi obtido pelo mapa de erosividade da chuva do estado de Minas Gerais (MELLO et al., 2007). Para tanto foi feito o recorte da área de estudo por meio da ferramenta de recorte de máscara do software QGIS versão 3.34.6.

O Fator K foi estimado por meio de valores atribuídos para classes de solo. Para tanto, foi utilizado como base o mapa de solos de Minas Gerais (UFV, 2015). O recorte da área de estudo e a reclassificação de classes de solo para valores de K também foram feitos em ambiente SIG, no software QGIS versão 3.34.6. Na Tabela 1 são apresentadas as classes de solo da área de estudo e seus respectivos valores de solo de acordo com a literatura.

Tabela 1: Valores de K para cada classe de solo da área de estudo

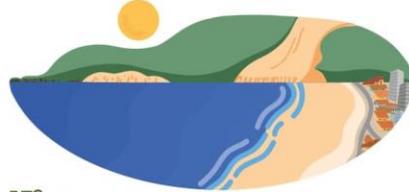
Classes de solo	Valor de K
Afloramento rochoso	0,001*
Argissolo vermelho	0,0200
Argissolo vermelho-amarelo	0,0466
Cambissolo háplico	0,0340
Cambissolo húmico	0,0433
Gleissolo melânico	0,0043
Latossolo amarelo	0,0570
Latossolo vermelho	0,011**
Latossolo vermelho-amarelo	0,012
Neossolo litólico	0,1448
Nitossolo háplico	0,0030

* Valor hipotético

** Único valor que não foi usado de Mannigel et al. (2002). Para esta classe de solo o valor de K foi baseado em Olivetti et al. (2015) que foi calculado com amostras de solo dentro da área de estudo

O fator LS foi calculado pelo algoritmo de Desmet e Govers (1996). Para tanto foi aplicado como entrada o Modelo Digital de Elevação Copernicus que foi baixado pela extensão *Open Topography* dentro do QGIS 3.34.6.

Os fatores C e P também foram baseados em estudos da literatura (Tabela 2). Para tanto, foi utilizado como base a coleção 9 de classificação de uso e cobertura do solo do projeto MapBiomas para o ano de 2023 (SOS Mata Atlântica/INPE, 2023). O recorte da área de estudo também foi feito em ambiente SIG. Os valores de C e P entram no modelo InVEST como uma tabela externa em formato .csv.



15º SIMPÓSIO NACIONAL DE
GEOMORFOLOGIA

Tabela 2: Valores de C e P para as classes de uso e cobertura do solo.

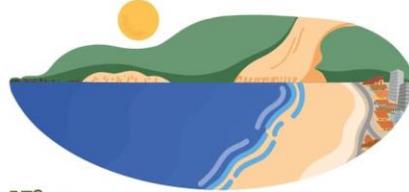
Uso e cobertura do solo	Valor de C*	Valor de P*
Formação florestal	0.02	0.01
Eucalipto	0.30	0.4
Formação Campestre	0.075	0.4
Pastagem	0.075	0.6
Cana de açúcar	0.10	0.5
Mosaico de usos	0.07	0.7
Área urbana	0.05	0.09
Áreas não vegetadas	1	1
Mineração	0.9	1
Água	0	0
Soja	0.14	0.5
Outras culturas temporárias	0.13	0.5
Café	0.08	0.5
Outras culturas perenes	0.08	0.5

*Adaptado de Ayer et al. (2015) e Olivetti et al. (2015)

O modelo InVEST foi aplicado em dois cenários que apenas se diferenciaram em relação aos fatores C e P. O primeiro cenário é o realista considerando o uso e cobertura do solo do projeto MapBiomass, coleção 9, de 2023. O segundo cenário é hipotético, considerando que todas as áreas passíveis de APP estão preservadas, com presença de formação florestal. Para tanto, foi baixada, no geoportal do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Minas, as áreas de APP da região Sul de Minas Gerais baseado no Cadastro Ambiental Rural. A transformação de cenários foi feita no QGIS 3.34.6 pelas ferramentas de geoprocessamento, edição de tabela de atributos e conversão de vetor para raster. A taxa SDR no modelo InVEST é calculada pela metodologia de Borselli et al. (2015).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação do modelo InVEST permitiu uma compreensão aprofundada da dinâmica de estimativa da perda de sedimentos nas bacias hidrográficas analisadas, com destaque para a comparação entre diferentes cenários de uso e cobertura do solo. A Figura 3 apresenta os mapas de perda de solo nos cenários real e simulado. Observa-se uma redução significativa nas taxas de perda de solo no cenário simulado, no qual todas as Áreas APP foram consideradas como florestadas. Destaca-se, em especial, a transição de



15º SIMPÓSIO NACIONAL DE
GEOMORFOLOGIA

áreas originalmente com perdas entre 20 a 30 t ha⁻¹ ano⁻¹ para classes de menor magnitude. Maiores detalhes são apresentados na Tabela 3, que evidencia a redução nas taxas de perda de solo em todas as nove bacias analisadas. Ressalta-se que todas essas bacias apresentam elevadas taxas de desmatamento e expressiva presença de APP não florestada. Destacam-se, nesse contexto, a bacia C, com a maior taxa de desmatamento, e a bacia I, que possui o menor percentual de APP preservadas e a maior taxa de perda de solo.

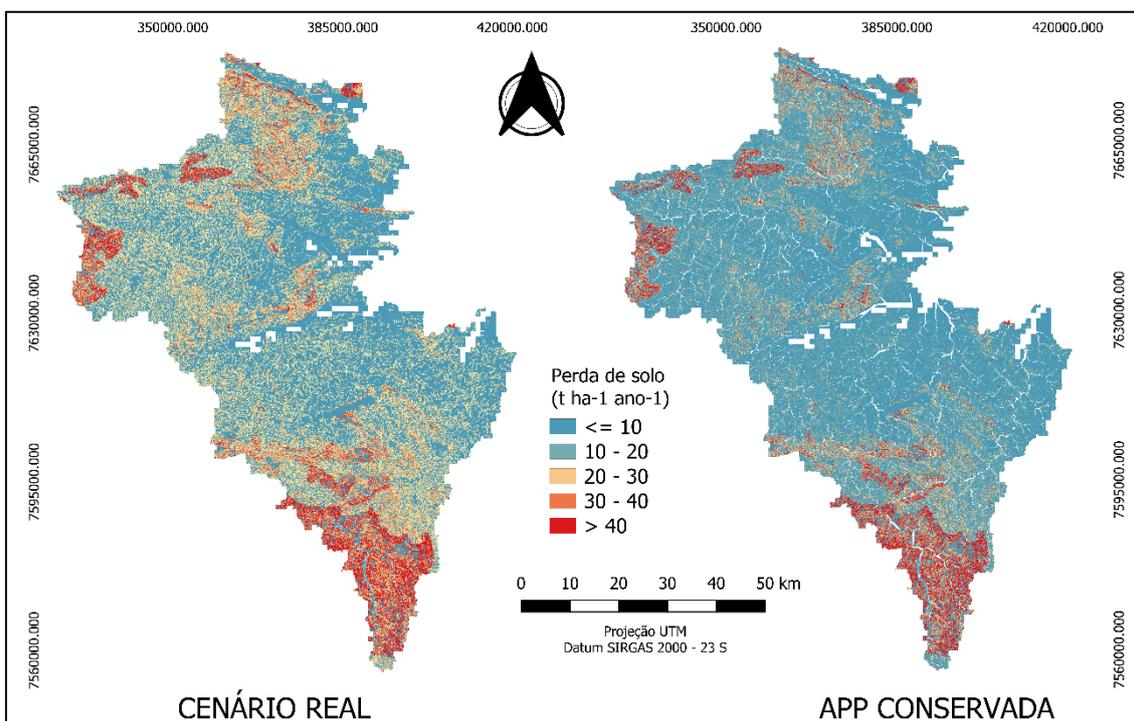


Figura 3: Mapas de perda de solo, gerado pela vertente SDR do InVEST, na área de estudo em cenário real e simulado, considerando as áreas de APP florestada

Tabela 3: Percentuais de desflorestamento e perdas de solo nas bacias de estudo

Bacias	Área Florestada	APP Preservada	Perda Real*	Perda Hipotética*	Real – Hipotético*
A	17%	27%	4.873.544	4.518.330	355.214
B	28%	28%	5.476.287	5.030.159	446.128
C	12%	22%	1.203.959	1.156.746	47.213
D	9%	13%	895.887	849.034	46.853
E	13%	21%	18.652.849	17.072.949	1.579.900
F	15%	24%	11.585.111	10.721.801	863.310
G	12%	24%	4.386.949	4.170.833	216.116
H	17%	22%	3.425.990	3.266.019	159.971
I	15%	13%	23.310.264	21.769.407	1.540.857

* Valores em t ha⁻¹ ano⁻¹



Apesar da viabilidade de gerar os resultados mencionados, é importante mencionar algumas limitações associadas tanto à precisão dos dados de entrada quanto à estrutura do modelo InVEST-SDR, bem como às implicações de seu uso exclusivo para inferências sobre processos hidrossedimentológicos e serviços ecossistêmicos em bacias hidrográficas.

Sobre o primeiro ponto, vale mencionar que os fatores R e K foram obtidos em estudos de grande escala, assim carentes de maior especificidade local. No caso do fator K, idealmente este deveria ser estimado por meio de métodos indiretos, com base em parâmetros físico-químicos do solo, em vez de valores generalizados por classes de solo (OLIVETTI et al., 2015). No entanto, a obtenção de tais dados não foi possível até o momento, sobretudo devido à grande extensão da área de estudo.

No que tange à estrutura do modelo InVEST na vertente SDR, destaca-se como principal limitação o uso do fator C que exige a atribuição de valores fixos por tipo de uso e cobertura do solo. No entanto, estudos sugerem que o uso de índices de vegetação, podem fornecer uma representação mais acurada, dado que uma mesma classe de cobertura pode apresentar diferentes níveis de vigor vegetativo, influenciando diretamente o fator C (FELIX et al., 2023).

Por fim, é necessário apontar que a utilização exclusiva do modelo RUSLE-SDR como ferramenta de diagnóstico pode ser limitada para fins de planejamento de intervenções em bacias hidrográficas, especialmente no que se refere à definição de áreas prioritárias para ações de conservação e revitalização. Como alternativa ou complemento, modelos mais abrangentes, como o SWAT (Soil and Water Assessment Tool), oferecem vantagens ao considerar explicitamente o ciclo hidrológico completo da bacia, permitindo, além da estimativa da perda de solo, a quantificação da produção de água (GUO et al., 2019). Além disso, o próprio InVEST, por meio de seus outros módulos, permite uma avaliação mais integrada dos serviços ecossistêmicos, incluindo estimativas de sequestro de carbono, dinâmica de nutrientes e produção hídrica, contribuindo de forma mais holística para o planejamento ambiental e o manejo sustentável de bacias hidrográficas.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de modelos InVEST-SDR em cenário real e simulados reforçam o papel das APPs na redução da perda de solo em bacias hidrográficas, especialmente quando florestadas. A análise entre cenários evidencia a eficácia de ações de restauração na mitigação de processos erosivos.

Apesar da utilidade do modelo, limitações nos dados de entrada e na estrutura do SDR indicam a necessidade de melhorias metodológicas. Como próximos passos, propõe-se o refinamento dos parâmetros da RUSLE-SDR e a aplicação de modelos mais integrados, como o SWAT e outras vertentes do InVEST, que considerem produção hídrica e serviços ecossistêmicos, ampliando a capacidade de suporte ao planejamento e gestão ambiental.

Palavras-chave: Reservatório de Furnas; Modelo InVEST, Perda de solo, Revitalização de bacias hidrográficas.

REFERÊNCIAS

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Relatório de Análise de Impacto Regulatório (AIR): Estabelecimento de condições de operação dos reservatórios do Sistema Hídrico do Rio Grande.** Superintendência de Operações e Eventos Críticos - SOE. Brasília, 2023.

BORSELLI, L., CASSI, P., TORRI, D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. **Catena** 75, 268–277, 2008.

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

FELIX, F.C., CÂNDIDO, B.M., DE MORAES, J.F.L. How suitable are vegetation indices for estimating the (R)USLE C-factor for croplands? A case study from Southeast Brazil. **ISPRS Open J. Photogramm. Remote Sens.** v.10, n.100050, 2023.

GUO, Y.; PENG, C.; ZHU, Q.; et al. Modelling the impacts of climate and land use changes on soil water erosion: Model applications, limitations and future challenges. **Journal of Environmental Management**, v. 250, n. March, p. 109403, 2019.

IGWE, P.U.; et al. Soil Erosion: A Review of Models and Applications. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 4, n. 12, 2017.



JORGE GODOY, M.; LUIZ ARAÚJO SOBRINHO, F. **The multiple uses of the waters of the reservoir lake of Furnas, Minas Gerais: tourism, electric power generation and conflicts.** p. 128, 2017.

KETEMA, A.; DWARAKISH, G. S. Water erosion assessment methods: a review of water erosion assessment method: a review. **ISH Journal of Hydraulic Engineering**, v. 00, n. 00, p. 1–8, 2019. Taylor & Francis.

MANNIGEL, A.R.; et al. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. **Acta Sci. Agron.** 24, 1335, 2002.

MDR – Ministério do Desenvolvimento Regional. **Programa Nacional de revitalização de Bacias Hidrográficas.** Brasília, 2021

MELLO, C.R.D.; et al. Erosividade mensal e anual da chuva no Estado de Minas Gerais. **Pesqui. Agropecuária Bras.** 42, 537–545. 2007

MME – Ministério de Minas e Energia. **Plano de Recuperação dos Reservatórios de Regularização de Usinas Hidrelétricas do País.** Brasília, 2022

OLIVETTI, D.; et al. Spatial and temporal modeling of water erosion in dystrophic red latosol (oxisol) used for farming and cattle raising activities in a sub-basin in the south of Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia (UFPA)** v. 39, p. 58-67, 2015

RENARD K.G.; et al. **Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE).** Washington, DC: USDA, Agriculture handbook n. 703, 1997. 384p.

SHARP, R.; et al. **InVEST User's Guide.** Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund, 2020.

SOS Mata Atlântica/INPE. **Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica: Período 2021-2022. Relatório técnico.** Disponível em: <https://educacao.cemaden.gov.br/midioteca/atlas-dos-remanescentes-florestais-da-mata-atlantica/>.

UFV – Universidade Federal de Viçosa. **Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais.** Viçosa, 2015. Disponível em: <https://dps.ufv.br/software/>

VIANI, R.A.G.; BRACALE, H.; TAFFARELLO, D. Lessons Learned from the Water Producer Project in the Atlantic Forest, Brazil. **Forests**, v. 10, n. 1031, 2019

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses a guide to conservation planning.** Agriculture Handbook, n. 537, U.S. Department of Agriculture, Washington, 1978