



AVALIAÇÃO DO EFEITO DE PRÁTICAS CONSERVACIONISTAS NA CARGA DE SEDIMENTOS POR MEIO DA MODELAGEM HIDROLÓGICA

Fábio Luiz Mação Campos ¹
André Luiz Nascentes Coelho ²
Danielle de Almeida Bressiani ³

RESUMO

Os processos erosivos e a produção de sedimentos em bacias hidrográficas têm um impacto significativo para as atividades humanas e podem comprometer a segurança hídrica em diversas regiões do mundo. Uma das alternativas para mitigar os efeitos dos processos erosivos em bacias hidrográficas é a aplicação de práticas conservacionistas. Essas práticas podem colaborar com o aumento da disponibilidade hídrica e a redução da carga sedimentar em cursos d'água reduzindo assim o assoreamento e outros impactos ambientais. Neste trabalho, vamos analisar o efeito de cinco práticas conservacionistas em 2 pequenas bacias hidrográficas localizadas no estado do Espírito Santo por meio da simulação de cenários com o modelo SWAT+ (*Soil and Water Assessment Tool*). Os resultados mostram que as práticas conservacionistas foram eficientes no aumento das vazões mínimas e na redução dos picos de vazão, porém os destaques mostrados neste trabalho irão enfatizar o efeito dessas práticas sob a redução da carga sedimentar no exutório das bacias estudadas. Os resultados mostraram que a alteração com aplicação das práticas variou entre um aumento de 2,17% a uma redução de 14,18% no exutório das bacias.

Palavras-chave: SWAT+; bacia hidrográfica, hidrossedimentologia, erosão.

ABSTRACT

Erosive processes and sediment production in river basins have a significant impact on human activities and can compromise water security in several regions of the world. One alternative to mitigate the effects of erosion in river basins is the application of conservation practices. These practices can contribute to increasing water availability and reducing sediment load in watercourses, thus reducing siltation and other environmental impacts. In this work, we will analyze the effect of five conservation practices in two small river basins located in the state of Espírito Santo through scenario simulations using the SWAT+ (*Soil and Water Assessment Tool*) model. The results show that conservation practices were effective in increasing minimum flows and reducing peak flows. However, the highlights presented in this work will emphasize the effect of these practices on reducing sediment load in the outlets of the studied basins. The results showed that changes resulting from the application of these practices ranged from a 2.17% increase to a 14.18% reduction in the basin outflows.

Keywords: SWAT+; watershed, hydrosedimentology, erosion.

¹ Professor da Universidade Federal do Espírito Santo – Ifes, autorprincipal@email.com;

² Professor da Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, alnc@gmail.com;

³ Professora da Universidade Federal de Pelotas – UFPel, daniebressiani@gmail.com;



INTRODUÇÃO

A erosão do solo tem uma perda bruta anual estimada de cerca 35,9 bilhões de toneladas (Borrelli *et al.*, 2017) e a erosão e o transporte de sedimentos atua de forma determinante na qualidade da água pois a carga de sedimentos nos rios provocam um aumento do assoreamento, diminui o fluxo hídrico e também atua como um transportador de nutrientes (Maringanti; Chaubey; Popp, 2009).

A abordagem chamada de *Nature based Solutions* vem ganhando cada vez mais notoriedade no combate a esses desafios, pois é considerado um conceito guarda-chuva que abrange uma gama de abordagens diferentes (Cohen-Shacham *et al.*, 2016). As práticas conservacionistas ou *Best Management Practices* – *BMPs* podem ser consideradas uma solução baseada na natureza para combater os picos de fluxo, a erosão do solo e a poluição de fontes difusas (Srivastava *et al.*, 2023). Nas últimas décadas, essas práticas de conservação provaram ser uma medida eficaz para prevenir ou minimizar a erosão do solo e os seus impactos negativos nas culturas, na água e nos solos (ElKadiri *et al.*, 2023). A implementação das *BMPs* é crucial para proteger e restaurar bacias hidrográficas, mas a identificação dos esquemas ideais de alocação de *BMPs* ainda enfrenta muitos desafios (Wang *et al.*, 2023).

A aplicação de *BMPs* individuais e combinadas foi alvo de investigação por diferentes autores (Ex.: Mtibaa; Hotta; Irie, 2018; Naganur *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2023), mas pouco foi explicitado acerca de seus efeitos nas diferentes características encontradas nas bacias de estudo.

Este trabalho mostra os procedimentos e resultados da aplicação de *BMPs* usando o SWAT+ (*Soil and Water Assessment Tool Plus*) em 2 diferentes bacias hidrográficas e objetiva avaliar os efeitos de 5 diferentes *BMPs* e tecer considerações sobre sua eficácia em diferentes culturas agrícolas e diferentes faixas de declividade.

Além disso, a avaliação da alteração da vazão realizadas com modelos hidrológicos normalmente é avaliada em termos de vazão média, mínima, máxima ou vazões de permanência. Neste trabalho, propomos uma avaliação da alteração das vazões ao longo de toda a curva de permanência do curso d'água, o que possibilita uma tomada de decisão mais assertiva por parte dos gestores e usuários de água.

METODOLOGIA

As bacias hidrográficas usadas neste estudo são delimitadas a montante de duas estações fluviométricas e foram nomeadas de Iconha (ICO) e Rio Bonito (RBO), ambas estão localizadas no estado do Espírito Santo, Brasil entre as latitudes $20^{\circ} 04' 48''$ e $20^{\circ} 47' 24''$ S e entre as longitudes $41^{\circ} 1' 48''$ e $41^{\circ} 47' 23''$ W. A localização das áreas de estudo e suas características hidrográficas e altimétricas podem ser vistas na Figura 1.

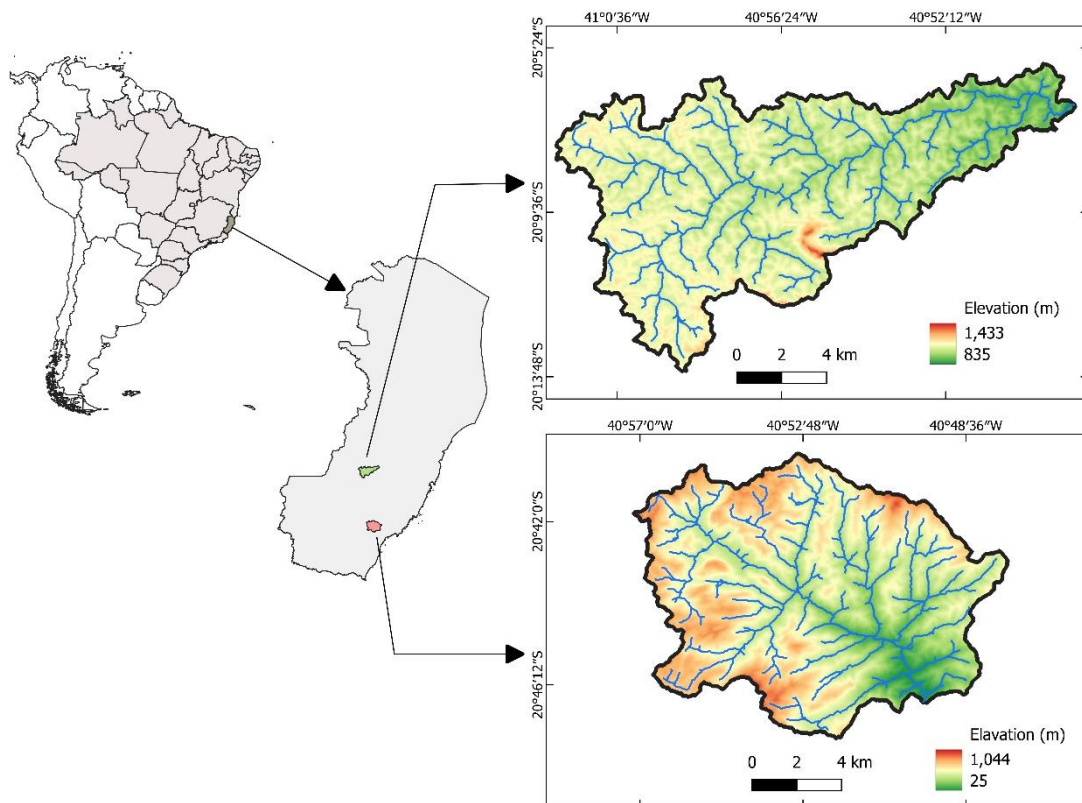


Fig. 1. Mapa de Localização das áreas de estudo

Os procedimentos metodológicos utilizados para realização da pesquisa incluíram a aquisição de dados de entrada (Hidrológicos, Climáticos, Modelo Digital de Elevação, Solos, Uso da terra) e sua posterior inserção no modelo SWAT+. A partir desses dados foi delimitada a área de contribuição da bacia e as unidades de respostas hidrológica. Maiores detalhes sobre a entrada de dados e a modelagem das bacias podem ser observados em (Campos; Coelho; *et al.*, 2024; Campos; Domingues; *et al.*, 2024)

A modelagem hidrológica foi realizada conforme o esquema mostrado na Figura 2, utilizando dos softwares QGis 3.34 / QSWAT+ 2.4.7, SWAT+ Editor 2.3.3, seguido da calibração com os RStudio 4.3.0 e pacote RSWAT 3.0. Na legenda da figura são mostradas que etapas foram realizadas com o auxílio de cada um dos softwares utilizados.

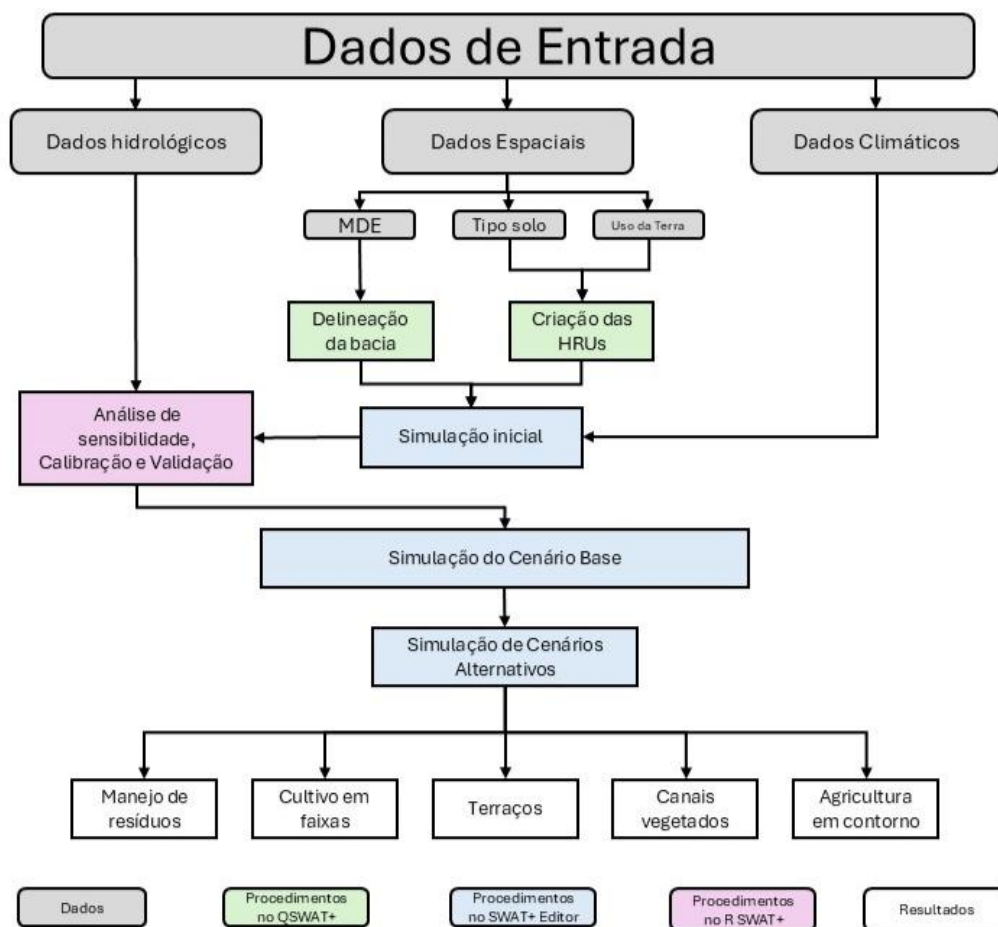


Fig. 2. Fluxograma da modelagem e simulação de cenários.

Foi realizada uma simulação inicial do comportamento da vazão e procedida a análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo, alterando os parâmetros do modelo e gerando um cenário base de representação do comportamento das bacias.

A partir desse cenário, foram simuladas a implementação de 5 diferentes BMPs (Manejo de resíduos, Cultivo em faixas, Terraços, Canais vegetados e Agricultura de contorno).

Os resultados foram da implementação dessas práticas foram comparados com o cenário base em termos da alteração na produção de sedimentos e da alteração de vazão em cada uma das bacias.

REFERENCIAL TEÓRICO

Os Modelos hidrológicos são considerados uma ferramenta importante e necessária para a gestão dos recursos hídricos e ambientais (Devia; Ganasri; Dwarakish, 2015)



e para fornecer estimativas espaciais e temporais valiosas destes recursos, ajudando a analisar possíveis projeções e cenários (Sood; Smakhtin, 2015).

Um dos usos mais frequentes observados na literatura quando se trata do uso dos modelos hidrológicos é a criação de cenários alternativos para previsão de impactos na quantidade e qualidade da água. Entre as possibilidades de cenários, alternativas de uso da terra são muito simuladas em todo o mundo.

Outra abordagem muito interessante que pode ser realizada pelos modelos é a simulação dos efeitos de práticas conservacionistas e boas práticas de manejo (*Best Management Practices - BMPs*). Uniyal *et al.* (2020) simularam cenários de aplicação dessas práticas numa bacia da Índia e demonstraram que algumas dessas práticas combinadas poderiam proporcionar a uma redução dos sedimentos em até 80%.

Estudos que analisaram os efeitos de BMPs na redução de sedimentos encontraram valores parecidos para cenários com os *Grassed Waterways*. (Leh *et al.*, 2018; Oduor *et al.*, 2023) por encontraram reduções entre 7,3% e 14%. (Mtibaa; Hotta; Irie, 2018) por sua vez, ao aplicar as práticas de *Residue Management* e *Strip-cropping* encontrou reduções consideravelmente maiores (27,5% e 30% respectivamente). Um estudo de (Ricci *et al.*, 2020) também mostrou uma redução muito mais substancial que a encontrada neste trabalho para cenários com *Contour farming* (22%).

Confome concluíram (Uniyal, B. *et al.*, 2020) os BMP estruturais são mais eficazes na redução da produção de sedimentos do que os BMP agrícolas, o que foi corroborado com os resultados. No entanto, outros estudos como o de (Silva *et al.*, 2023) apontaram maior eficácia das medidas vegetativas. Estudos como o de (Bracmort *et al.*, 2006) e (Silva *et al.*, 2023) apontaram ainda que a combinação de diferentes BMPs pode aumentar a eficácia de cenários de conservação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da modelagem das bacias foram considerados satisfatórios considerando sua avaliação conforme os índices de correlação R^2 , NSE (*Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient*), Pbias e RSR e considerados satisfatórios.

Os resultados da vazão mensal simulada pelo pelo modelo, sua comparação com a vazão observada e os índices obtidos na calibração são mostrados nas figuras 3 e 4.

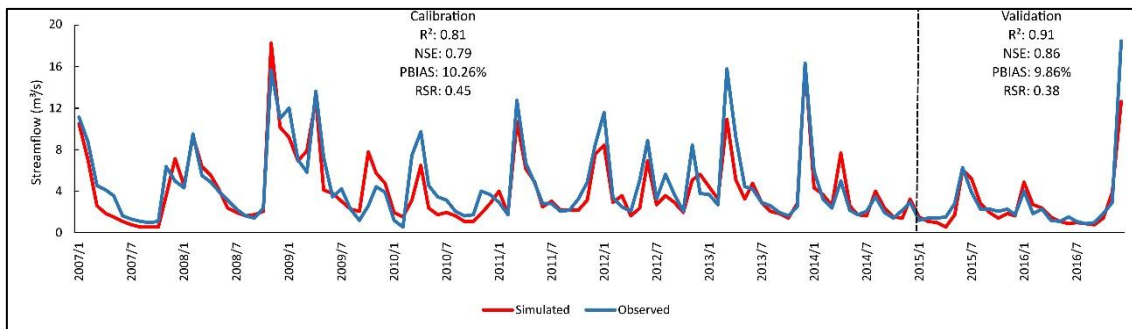


Fig. 3. Comparação da vazão mensal simulada e observada na Bacia de Iconha.

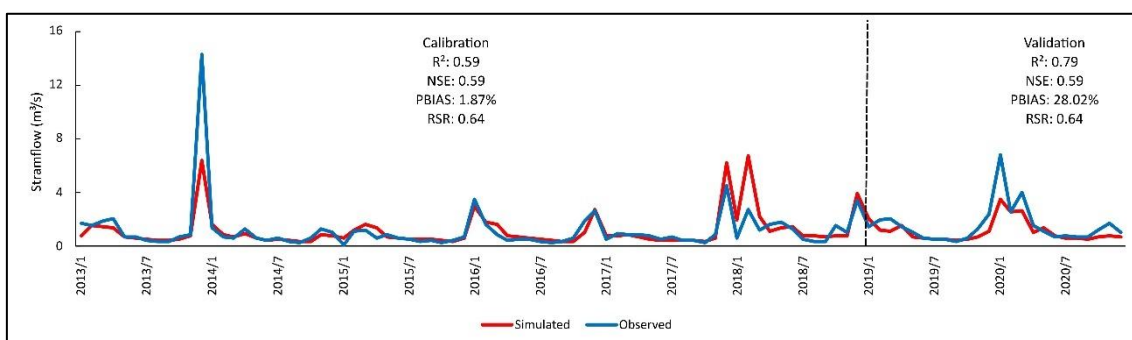


Fig. 4. Comparação da vazão mensal simulada e observada na Bacia de Rio Bonito.

Como pode-se observar o comportamento hidrológico das bacias foi bem representado através do período simulado pelo modelo. Porém, não foi possível realizar a calibração da carga sedimentar nas bacias pois não haviam medições para comparar com os resultados fornecidos pelo modelo.

Através da modelagem, no entanto, foi possível estimar a produção de sedimentos em diferentes unidades da paisagem em cada uma das bacias. Os valores da produção de sedimentos variam consideravelmente de acordo com as características encontradas em cada unidade da paisagem, pelas diferenças de relevo e uso da terra.

A fim de ilustrar a produção de sedimentos nas bacias estudadas foram elaborados os mapas mostrados nas figuras 5 e 6.

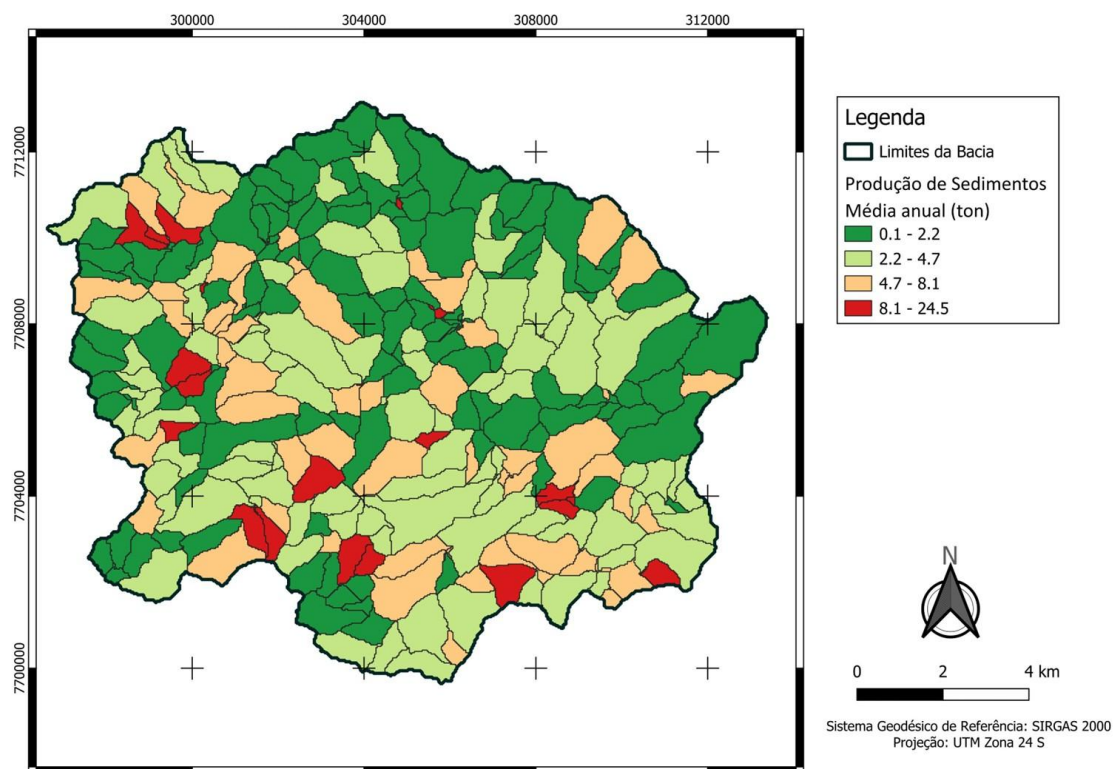


Fig. 5. Valores da produção de sedimentos na Bacia de Iconha.

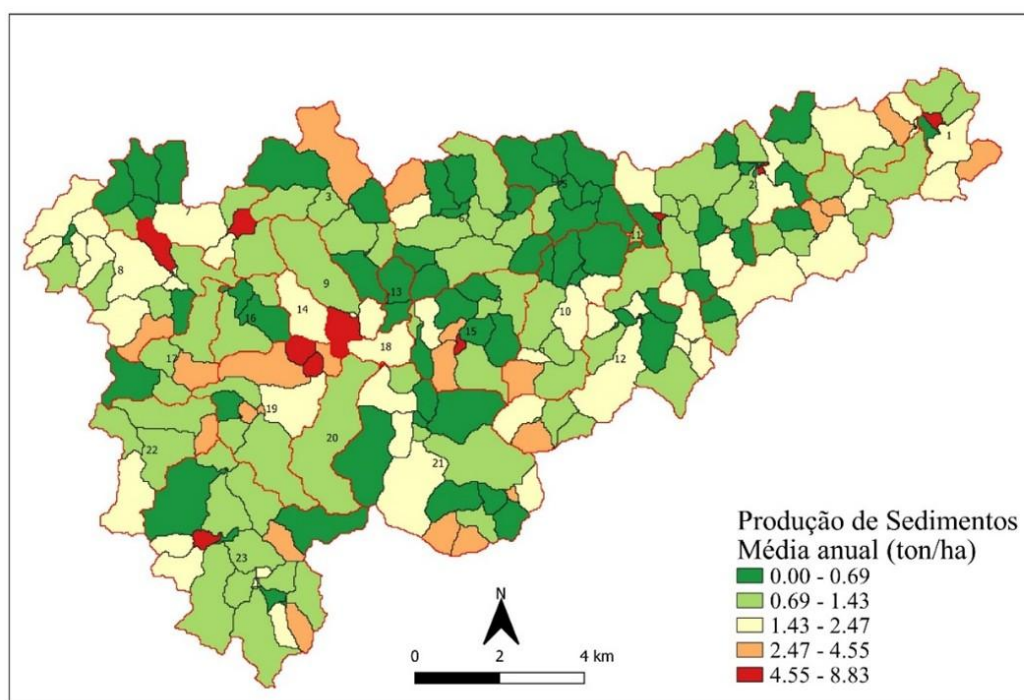


Fig. 6. Valores da produção de sedimentos na Bacia de Rio Bonito.



A comparação dos resultados das simulações realizadas com a aplicação das práticas conservacionistas e o cenário base, permitiu perceber um aumento das vazões mínimas e redução das vazões de pico nas 4 práticas que modificaram o balanço hídrico, em diferentes graus de alteração para cada BMP e cada bacia. A comparação dos componentes do balanço hídrico mostrou um aumento da infiltração e redução do escoamento superficial para 4 dos cenários testados, com destaque para a prática dos terraços e não alterou na aplicação de canais vegetados.

A carga sedimentar foi comparada com o cenário base para cada uma das BMPs no exutório de cada bacia. A comparação do total de sedimentos transportados é apresentada nas Figuras 10 e 11 e mostra que o efeito das BMPs foi ligeiramente diferente entre as bacias.

Na bacia de Rio Bonito a BMP que obteve maior êxito na redução da descarga sólida foram os Canais vegetados (14,18%), seguida dos terraços (6,88%), Cultivo em faixas (5,8%) e Manejo de resíduos (0,97%). A aplicação do Agricultura de contorno resultou em um aumento de 0,9% nos sedimentos.

A redução da descarga sólida na bacia de Iconha foi mais efetiva com a aplicação dos terraços (13,87%), seguida dos Canais vegetados (10,83%), Cultivo em faixas (10,87%) e Manejo de resíduos (2,92%). Assim como na outra bacia, a aplicação do Agricultura de contorno resultou em um aumento de sedimentos (2,17%).

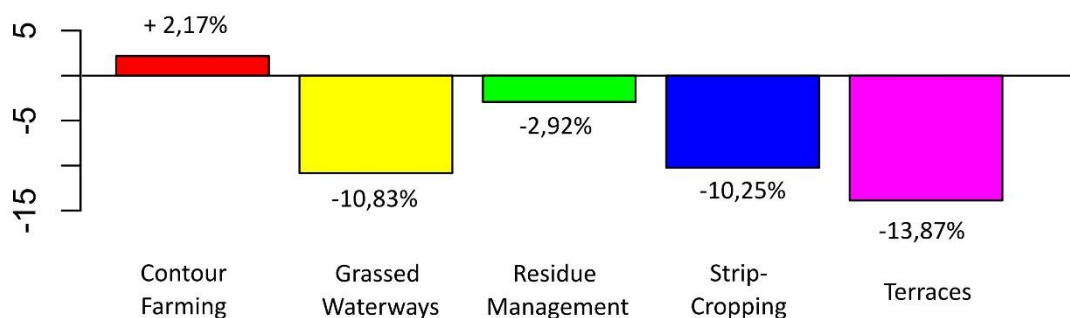


Fig. 7. Variação da carga de sedimentos entre cenários base e BMP na bacia hidrográfica de Iconha.

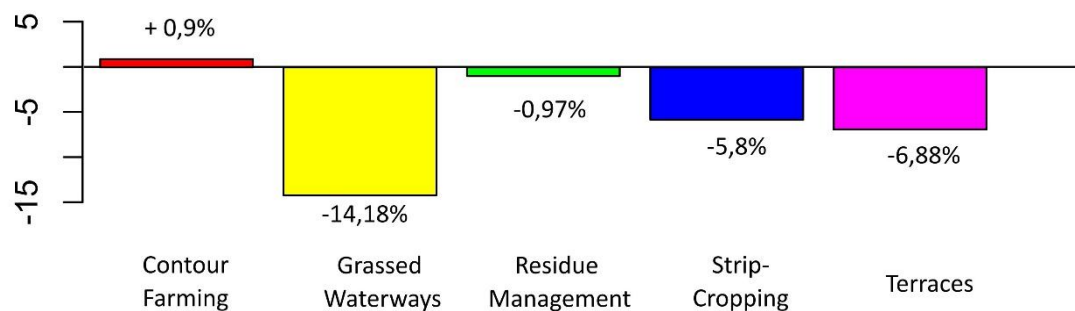


Fig. 8. Variação da carga de sedimentos entre cenários base e BMP na bacia hidrográfica de Iconha.

Quando à carga de sedimentos observada no exutório das bacias, apenas a prática da agricultura de contorno aumentou a carga. As demais práticas provocaram reduções que variaram entre 0,97% e 14,83%,

De maneira geral, os resultados da aplicação das BMPs foram mais impactantes na Bacia de Iconha. Porém, como a área alvo da aplicação das BMPs foi consideravelmente diferente, a efetividade das BMPs foi comparada com cada um dos usos da terra por meio da avaliação da produção de água e sedimentos.

O efeito pouco significativo de algumas práticas na redução de sedimentos pode ser explicado pela forma de propagação dos sedimentos nas bacias hidrográficas, pois os sedimentos saltam e param em diferentes zonas de armazenamento (Noe et al., 2020). Por isso, o efeito da redução de sedimentos tende a ser maior em pequenos compartimentos da paisagem que na bacia como um todo (Ahsan et al., 2023; Her et al., 2016).

Os resultados mostraram também que a produção de sedimentos foi mais reduzida quando as práticas conservacionistas foram aplicadas em áreas com maior declividade média, mas tiveram resultados fortemente diferentes em determinadas culturas agrícolas.

As diferenças encontradas entre os diversos estudos quanto a redução da carga de sedimentos provocada pela implementação de BMPs mostram que as características da bacia, as condições climáticas e as culturas agrícolas podem provocar diferentes efeitos das BMPs, o que sugere que essa análise seja realizada individualmente para cada bacia hidrográfica.

De maneira geral, os resultados da aplicação das BMPs foram mais impactantes na Bacia de Iconha, havendo maior impacto em Rio Bonito apenas das Grassed Waterways. Porém, como a área alvo da aplicação das BMPs foi consideravelmente diferente, a efetividade das BMPs foi comparada com cada um dos usos da terra por meio da avaliação da produção de água e sedimentos.



O efeito pouco significativo de algumas práticas na redução de sedimentos pode ser explicado pela forma de propagação dos sedimentos nas bacias hidrográficas, pois como explicou (Noe et al., 2020) os sedimentos “*hops and rest*” em diferentes zonas de armazenamento. Por isso, como observaram (Ahsan et al., 2023; Her et al., 2016) o efeito da redução de sedimentos tende a ser maior nas HRUs, que nas sub-bacias e na bacia como um todo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os métodos de aplicação e parâmetros utilizados para implementação das BMPs no SWAT+ mostraram que o modelo pode ser uma valiosa ferramenta para avaliação individual de bacias e suporte à gestão de recursos hídricos, manejo de sedimentos e controle da erosão.

Com as mudanças climáticas os efeitos nas vazões máximas (enchentes) e mínimas (estiagem) são mais importantes que a média propriamente. A análise da alteração da vazão ao longo da curva de permanência das bacias mostrou que diante do aumento das vazões de pico e do prolongamento dos episódios de estiagem provocadas por eventos climáticos extremos, a aplicação das BMPs pode ser uma alternativa muito útil para amenizar os impactos e contribuir para a adaptabilidade às mudanças climáticas.

Avaliações como as que são mostradas nesse trabalho, são um passo importante para identificação de áreas prioritárias para aplicação de BMPs e avaliações do custo-benefício de cada uma dessas práticas em diferentes bacias hidrográficas.

REFERÊNCIAS

- AHSAN, A.; DAS, S. K.; KHAN, Md. H. R. B.; NG, A. W. M.; AL-ANSARI, N.; AHMED, S.; IMTEAZ, M.; TARIQ, M. A. U. R.; SHAFIQUEZZAMAN, Md. Modeling the impacts of best management practices (BMPs) on pollution reduction in the Yarra River catchment, Australia. **Applied Water Science**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 98, abr. 2023. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01812-2>.
- BORRELLI, P.; ROBINSON, D. A.; FLEISCHER, L. R.; LUGATO, E.; BALLABIO, C.; ALEWELL, C.; MEUSBURGER, K.; MODUGNO, S.; SCHÜTT, B.; FERRO, V.; BAGARELLO, V.; OOST, K. V.; MONTANARELLA, L.; PANAGOS, P. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. **Nature Communications**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 2013, 8 dez. 2017. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>.
- BRACMORT, K. S.; ARABI, M.; FRANKENBERGER, J. R.; ENGEL, B. A.; ARNOLD, J. G. MODELING LONG-TERM WATER QUALITY IMPACT OF STRUCTURAL BMPs. **Transactions of the ASABE**, [s. l.], v. 49, n. 2, p. 367–374, 2006. <https://doi.org/10.13031/2013.20411>.



CAMPOS, F. L. M.; COELHO, A. L. N.; BRESSIANI, D. de A.; CAMPOS, I. C. H. M. Uso do modelo hidrológico SWAT+ para quantificação e espacialização de processos em apoio ao planejamento ambiental. **Revista Pantaneira**, [s. l.], v. 24, p. 119–137, 2024. .

CAMPOS, F. L. M.; DOMINGUES, M. S.; COELHO, A. L. N.; BRESSIANI, D. D. A. MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO ICONHA - ES: POTENCIALIDADES, DESAFIOS E SOLUÇÕES PARA PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS. **Geoconexões**, [s. l.], v. 3, n. 20, p. 78–104, 30 dez. 2024. <https://doi.org/10.15628/geoconexes.2024.17478>.

COHEN-SHACHAM, E.; WALTERS, G.; JANZEN, C.; MAGINNIS, S. (Orgs.). **Nature-based solutions to address global societal challenges**. [S. l.]: IUCN International Union for Conservation of Nature, 2016. DOI 10.2305/IUCN.CH.2016.13.en. Disponível em: <https://portals.iucn.org/library/node/46191>. Acesso em: 17 abr. 2024.

DEVIA, G. K.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. A Review on Hydrological Models. **Aquatic Procedia**, [s. l.], v. 4, p. 1001–1007, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>.

ELKADIRI, R.; MOMM, H. G.; BINGNER, R. L.; MOORE, K. Spatial Optimization of Conservation Practices for Sediment Load Reduction in Ungauged Agricultural Watersheds. **Soil Systems**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 4, 13 jan. 2023. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7010004>.

HER, Y.; CHAUBEY, I.; FRANKENBERGER, J.; SMITH, D. Effect of conservation practices implemented by USDA programs at field and watershed scales. **Journal of Soil and Water Conservation**, [s. l.], v. 71, n. 3, p. 249–266, 1 maio 2016. <https://doi.org/10.2489/jswc.71.3.249>.

LEH, M. D. K.; SHARPLEY, A. N.; SINGH, G.; MATLOCK, M. D. Assessing the impact of the MRBI program in a data limited Arkansas watershed using the SWAT model. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 202, p. 202–219, abr. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.02.012>.

MARINGANTI, C.; CHAUBEY, I.; POPP, J. Development of a multiobjective optimization tool for the selection and placement of best management practices for nonpoint source pollution control. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 45, n. 6, 2009. DOI 10.1029/2008WR007094. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2008WR007094>. Acesso em: 21 set. 2020.

MTIBAA, S.; HOTTA, N.; IRIE, M. Analysis of the efficacy and cost-effectiveness of best management practices for controlling sediment yield: A case study of the Joumine watershed, Tunisia. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 616–617, p. 1–16, mar. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.290>.

NAGANUR, S.; PATIL, N. S.; PATIL, V.; PUJAR, G. Evaluation of best management practices (BMPS) and their impact on environmental flow through SWAT+ model. **Modeling Earth Systems and Environment**, [s. l.], 9 fev. 2024. DOI 10.1007/s40808-023-01951-8. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s40808-023-01951-8>. Acesso em: 6 mar. 2024.

NOE, G. B.; CASHMAN, M. J.; SKALAK, K.; GELLIS, A.; HOPKINS, K. G.; MOYER, D.; WEBBER, J.; BENTHEM, A.; MALONEY, K.; BRAKEBILL, J.; SEKELLICK, A.;



LANGLAND, M.; ZHANG, Q.; SHENK, G.; KEISMAN, J.; HUPP, C. Sediment dynamics and implications for management: State of the science from long-term research in the Chesapeake Bay watershed, USA. **WIREs Water**, [s. l.], v. 7, n. 4, p. e1454, jul. 2020. <https://doi.org/10.1002/wat2.1454>.

ODUOR, B. O.; CAMPO-BESCÓS, M. Á.; LANA-RENAULT, N.; KYLLMAR, K.; MÅRTENSSON, K.; CASALÍ, J. Quantification of agricultural best management practices impacts on sediment and phosphorous export in a small catchment in southeastern Sweden. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 290, p. 108595, dez. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108595>.

RICCI, G. F.; JEONG, J.; DE GIROLAMO, A. M.; GENTILE, F. Effectiveness and feasibility of different management practices to reduce soil erosion in an agricultural watershed. **Land Use Policy**, [s. l.], v. 90, p. 104306, jan. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104306>.

SILVA, T. P.; BRESSIANI, D.; EBLING, É. D.; REICHERT, J. M. Best management practices to reduce soil erosion and change water balance components in watersheds under grain and dairy production. **International Soil and Water Conservation Research**, [s. l.], , p. S2095633923000424, jul. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.06.003>.

SOOD, A.; SMAKHTIN, V. Global hydrological models: a review. **Hydrological Sciences Journal**, [s. l.], v. 60, n. 4, p. 549–565, 3 abr. 2015. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.950580>.

SRIVASTAVA, S.; BASCHE, A.; TRAYLOR, E.; ROY, T. The efficacy of conservation practices in reducing floods and improving water quality. **Frontiers in Environmental Science**, [s. l.], v. 11, p. 1136989, 15 maio 2023. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1136989>.

UNIYAL, B.; JHA, M. K.; VERMA, A. K.; ANEBAGILU, P. K. Identification of critical areas and evaluation of best management practices using SWAT for sustainable watershed management. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 744, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140737>.

WANG, S.; TAN, Q.; LI, C.; ZHANG, S.; ZHANG, T. Planning of best management practices for watershed-scale pollution control: A simulation-based inexact fractional programming approach. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 617, p. 129063, fev. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129063>.