

Determinação da carga de sólidos totais em suspensão em cursos hídricos por meio de abordagem empírica

Phelipe da Silva Anjinho¹; Gabriela Leite Neves²; Mariana Abibi Guimarães Araujo Barbosa³; Denise Parizotto⁴; Allita Rezende dos Santos⁵; Thiago Alves dos Santos⁶, & Frederico Fabio Mauad⁷

ABSTRACT – Hydro-sedimentological modelling is an important tool to assess and understand sediment and pollutant dynamics in river basins. This study aims to simulate suspended sediment concentration (SSC) load in watercourses of the Lobo Stream Drainage Basin (LSDB), located in the interior São Paulo State, through empirical modelling in GIS software environment. Land use, topography and average SSC export coefficients data were used to quantify the SSC load generated from the areas of the basin. The results show that the model was not able to estimate the SSC load in LSDB watercourses. Although the observed and simulated data showed a good fit ($r^2 = 0.92$), a comparative analysis showed that the model overestimated the observed data, with a Pbias value equal to 1208.66% and REQM equal to 719 ton.year⁻¹.

Palavras-Chave – MQUAL, sedimentos, ribeirão do Lobo.

1 - INTRODUÇÃO

A erosão do solo é um processo dinâmico que envolve a degradação, transporte e deposição de sedimentos. Agentes naturais, como vento e água, e antrópicos são os principais fatores que induzem a erosão devido às mudanças na cobertura do solo e práticas inadequadas de manejo (Borrelli *et al.*, 2017). Esse fenômeno é um dos principais problemas ambientais que altera o fluxo de carbono orgânico e nutrientes, resultando em impactos na produtividade agrícola, na

1) Centro de Recursos Hídricos, Universidade de São Paulo – EESC/USP, Rodovia Domingos Innocentini, km 13, Itirapina (SP), e-mail: phelipe.anjinho@usp.br, (16) 3371 – 8255

2) Centro de Recursos Hídricos, Universidade de São Paulo – EESC/USP, Rodovia Domingos Innocentini, km 13, Itirapina (SP), e-mail: gabriela.leiteneves@usp.br, (16) 3371 – 8255

3) Centro de Recursos Hídricos, Universidade de São Paulo – EESC/USP, Rodovia Domingos Innocentini, km 13, Itirapina (SP), e-mail: mariana.abibi@usp.br, (16) 3371 – 8255

4) Centro de Recursos Hídricos, Universidade de São Paulo – EESC/USP, Rodovia Domingos Innocentini, km 13, Itirapina (SP), e-mail: deniseparizotto@usp.br, (16) 3371 – 8255

5) Centro de Recursos Hídricos, Universidade de São Paulo – EESC/USP, Rodovia Domingos Innocentini, km 13, Itirapina (SP), e-mail: allita@usp.br, (16) 3371 – 8255

6) Centro de Recursos Hídricos, Universidade de São Paulo – EESC/USP, Rodovia Domingos Innocentini, km 13, Itirapina (SP), e-mail: thiagokado@hotmail.com, (16) 3371 – 8255

7) Centro de Recursos Hídricos, Universidade de São Paulo – EESC/USP, Rodovia Domingos Innocentini, km 13, Itirapina (SP), e-mail: maudffm@sc.usp.br, (16) 3371 – 8255

biodiversidade e no clima do planeta (Hou *et al.*, 2020). Além dos impactos resultantes da perda de solo, a erosão também pode provocar a degradação das águas por meio da sedimentação de leitos, afetando negativamente os usos múltiplos da água (Annandale, 2006).

Vários modelos de erosão foram desenvolvidos com o objetivo de entender o comportamento dos sedimentos em bacias hidrográficas e auxiliar os tomadores de decisão na formulação de políticas e ações de conservação do solo (Fu *et al.*, 2019). A maioria dos modelos disponíveis demandam muitos dados para processar, calibrar e validar os resultados, o que acaba se tornando um grande desafio quando se trata de bacias não instrumentadas. Dessa forma, desenvolver métodos alternativos é importante para suprir a lacuna de dados e auxiliar o planejamento de bacias não monitoradas.

Da carga total de sedimentos transportada por um rio, a maior parte ocorre na forma de SST, sendo que concentrações elevadas podem indicar a ocorrência de intensos processos erosivos na bacia. Nesse sentido, esse trabalho teve como objetivo quantificar as cargas de SST nos cursos hídricos de uma pequena bacia hidrográfica localizada no interior do estado de São Paulo, por meio de uma modelagem empírica em ambiente SIG, baseada em coeficientes de exportação de SST gerados por classes de uso e ocupação do solo.

2 - MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 - Área de estudo

O estudo foi desenvolvido na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Lobo (BHRL), localizada na região centro-leste do estado de São Paulo. Situa-se entre os municípios de Brotas e Itirapina e ocupa uma área de drenagem de aproximadamente 221,5 km (Figura 1).



Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do ribeirão do Lobo. Fonte: elaborado pelo autor.

2.2 - Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistido

Nesse trabalho, utilizou-se um Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistido (MDE-HC) para determinar a direção de fluxo do escoamento superficial e identificar as áreas de acúmulo

na BHRL. O MDE-HC foi gerado a partir da interpolação de dados altimétricos, obtidos das imagens do projeto *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), e da rede de drenagem extraída das cartas topográficas dos municípios de Itirapina (SF-23-M-1-3) e São Carlos (SF-23-Y-A-1), em escala 1:50.000, adquiridas no Instituto Brasileiro de Geografia Estatística (IBGE). O algoritmo ANUDEM, desenvolvido por Hutchinson (1989), foi utilizado para interpolar os dados. As direções de fluxo foram determinadas utilizando o algoritmo Jenson e Domingues (1988), e as áreas de acúmulo por meio do cálculo do número de pixels que se acumulam na direção do escoamento superficial.

2.3 - Modelagem das cargas acumuladas de sólidos totais em suspensão

As cargas potenciais de exportação de SST foram determinadas com base nos coeficientes médios de exportação de SST, estabelecidos no Modelo Matemático de Correlação entre Uso do Solo e Qualidade da Água (MQUAL), versão 1.5, desenvolvido pela Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SMA, 2010). Esse modelo simula as cargas de SST a partir do mapeamento das fontes potenciais de poluição, que são representadas pelo uso e ocupação do solo da bacia.

Os dados de uso e ocupação do solo foram gerados a partir da classificação manual das imagens obtidas pelo *sensor Multispectral Instrument* (MSI), embarcado no satélite Sentinel - 2, com 13 bandas espectrais, sendo 4 com resolução espacial de 10 metros, 6 bandas com resolução de 20 metros e 3 bandas com resolução de 60 metros. Ambas estão referenciadas ao datum WGS 84, com data de passagem em 4 de fevereiro de 2018, obtidas na base de dados do *U.S Geological Survey* (USGS).

Foi necessário fazer a compatibilização dos valores das cargas, que estavam em $\text{kg.km}^{-2}.\text{ano}^{-1}$, com a área de cada pixel do mapa (900 m^2). O modelo de cargas de SST acumuladas na BHRL, em kg.ano^{-1} , foi gerado a partir da integração entre modelo de cargas distribuída por pixel e o modelo de direção de fluxo de escoamento, resultando no fluxo acumulado ponderado.

2.4 - Amostragem e análise de dados de sólidos totais em suspensão

Realizou-se amostragens de água para a análise de SST e foram medidos dados de vazão em doze campanhas realizadas entre 2018 e 2019. As amostras superficiais de água foram coletadas em dez pontos ao longo da LSHB (Figura 1), distribuídos entre os cursos hídricos: Água Branca (Ab1 e Ab-2), Itaqueri (It-1, It-2, It-3 e It-4) e Lobo (Lb-1, Lb-2, Lb-3 e Lb-4). Os valores de vazão foram determinados utilizando o método do molinete e as análises de SST foram realizadas em laboratório, com base na metodologia APHA (1995). Nos pontos It-1, Lb-1 e Lb-2 não foi possível realizar medições de vazão em todos os meses dos anos devido ao fluxo reduzido em períodos de estiagem.

2.5 - Avaliação do desempenho da modelagem distribuída das cargas de sólidos totais em suspensão

Os valores médios das doze campanhas foram utilizados para validar a metodologia. Indicadores estatísticos foram adotados para avaliar o desempenho dos valores simulados pela modelagem. São eles: Coeficiente de Nash e Sutcliffe, percentual da tendência (Pbias), raiz do erro quadrático médio (REQM) e o coeficiente de determinação (r^2).

3 - RESULTADOS

3.1 - Cargas simuladas de sólidos totais em suspensão na BHRL

A distribuição das cargas de SST acumuladas na rede de drenagem da BHRL é apresentada na Figura 2. A Tabela 1 apresenta os valores das cargas de SST simuladas para a BHRL e sub-bacias afluentes ao reservatório do Lobo. A carga total de SST simulada na bacia foi de 4437,16 ton.ano⁻¹. A sub-bacia do rio Itaqueri foi a que apresentou maior carga de SST, cujo valor simulado foi de 2167,94 ton.ano⁻¹, o que representa quase 50% das cargas produzidas na bacia. A sub-bacia do ribeirão do Lobo foi a segunda maior produtora de SST, gerando 1553,26 ton.ano⁻¹ (35%), seguida pela sub-bacia dos córregos Geraldo e Perdizes que juntas produzem 444,5 ton.ano⁻¹, o que representa 10% do total de SST gerados anualmente na BHRL. As maiores cargas específicas de SST também foram encontradas nas sub-bacias do rio Itaqueri e ribeirão do Lobo.

O maior aporte de SST concentra-se majoritariamente em áreas agrícolas que geram 65% dos SST produzidos na BHRL, seguido pelas atividades de silvicultura (12%) e áreas de vegetação natural (11%) (Figura 3). As culturas de cana de açúcar e citricultura são as principais atividades agrícolas da região e ocupam aproximadamente 15% da BHRL.

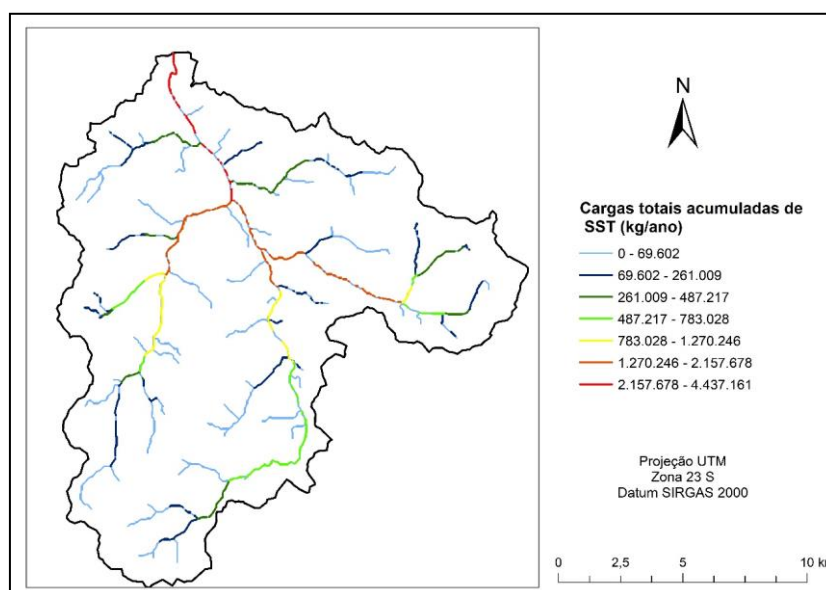


Figura 2 – Carga de SST simuladas na rede de drenagem da BHRL. Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 1 - Cargas totais acumuladas de SST nas sub-bacias afluentes ao reservatório Lobo e a proporção em relação à LSHB.

Sub-bacias afluentes ao reservatório do Lobo	Carga simulada de SST (ton.ano ⁻¹)	Carga específica simulada de SST (ton.km ² .ano ⁻¹)	Percentual (%)
Córrego Geraldo	251,49	14,32	5,67
Córrego Perdizes	193,06	11,00	4,35
Rio Itaqueri	2167,94	20,54	48,86
Ribeirão do Lobo	1553,26	24,33	35,01
BHRL	4437,16	20,03	100

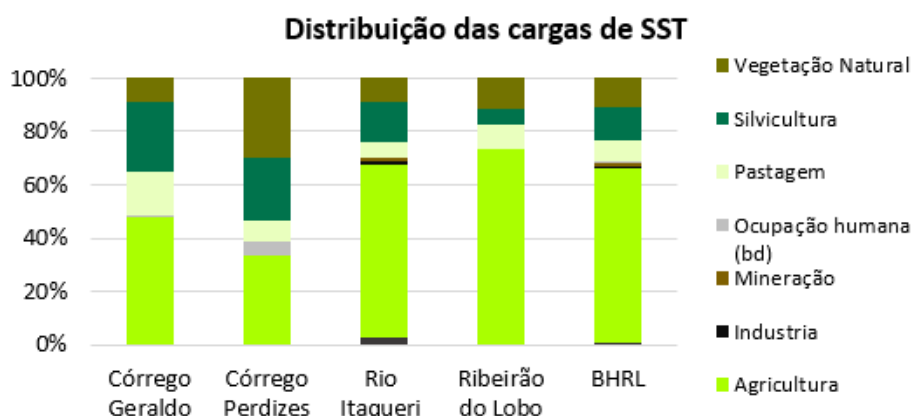


Figura 3 – Distribuição das cargas de SST por uso e ocupação do solo. Fonte: elaborado pelo autor.

3.2 - Validação do modelo de cargas totais em suspensão

A Figura 4 apresenta a regressão linear entre os dados simulados e observados. Os resultados mostram um bom ajuste entre os dados, com $r^2 = 0,92$. A Tabela 2 apresenta os valores simulados e observados das cargas de SST nos pontos de monitoramento estabelecidos na BHRL (Figura 1). Os resultados mostram que o modelo superestimou os dados observados. Os pontos que se situam nas regiões de cabeceira, próximo as nascentes do rio Itaqueri e ribeirão do Lobo, foram os que apresentaram a maior variação entre os dados simulados e observados. As menores variações foram encontradas nos pontos It3 e It4 que se situam no rio Itaqueri, próximo ao reservatório do Lobo.

A Tabela 3 apresenta os valores obtidos para os indicadores de desempenho utilizados nesse trabalho. O valor de NSE = - 404,88 foi considerado inaceitável; o Pbias indicou que o modelo superestimou em aproximadamente 1200% os valores observados; e o REQM indicou um desvio de 719 ton.ano⁻¹.

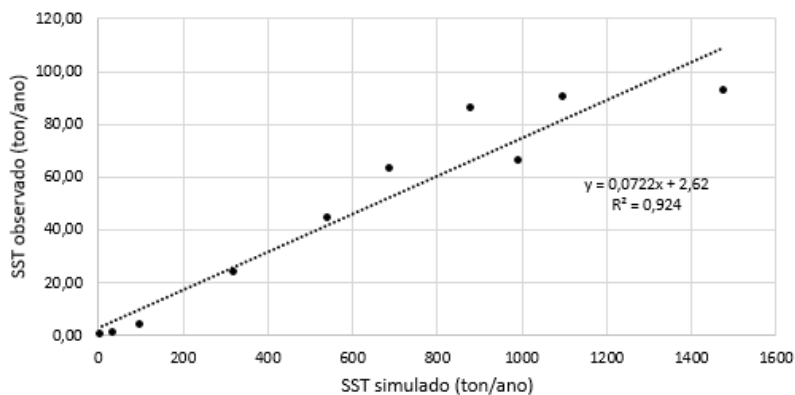


Figura 4 – Regressão linear entre as cargas simuladas e observadas. Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 2 – Cargas simuladas e observadas de SST nos pontos de monitoramento da BHRL.

Pontos de monitoramento	Observado (ton.ano ⁻¹)	Simulado (ton.ano ⁻¹)	Desvio (%)
Ab – 1	65,7	993,3	1411
Ab – 2	90,0	1098,9	1121
It – 1	0,2	8,0	4132
It – 2	23,8	321,5	1251
It – 3	62,8	689,6	999
It – 4	85,7	883,0	930
Lb – 1	0,9	35,3	3670
Lb – 2	3,9	98,7	2404
Lb – 3	44,1	542,5	1130
Lb – 4	92,6	1477,0	1495

Tabela 3 – Indicadores de desempenho do modelo de cargas de SST.

SST (ton.ano ⁻¹)			
NSE	Pbias	r ²	REQM
-404,88	1208,66	0,92	719,08

4 - DISCUSSÃO

Os resultados gerados nesse trabalho mostraram que as cargas de SST são majoritariamente geradas por fontes difusas, associadas as atividades agrícolas da região. Essas, encontram-se principalmente nas sub-bacias do rio Itaqueri e ribeirão do Lobo, que são as sub-bacias mais críticas no que se refere ao aporte de nutrientes e sedimentos ao reservatório do Lobo (MORUZZI et al., 2012; ARROIO JUNIOR, 2013; ANJINHO, 2019). Resultados semelhantes aos dessa pesquisa foram encontrados por Arroio Junior (2013), em que o autor, utilizando o modelo SWAT, avaliou a produção de sedimentos na BHRL e indicou que a sub-bacia do rio Itaqueri é a mais crítica, produzindo 65% do total de sedimentos gerados anualmente.

Ao contrário dos estudos de Lima et al. (2016) e Anjinho (2019) que utilizaram métodos semelhantes baseado no modelo MQUAL 1.5 para avaliar as cargas e concentrações de nutrientes em cursos hídricos de bacias hidrográficas, a abordagem empírica utilizada nessa pesquisa não

representou de forma adequada a dinâmica de SST na BHRL. Embora a análise de regressão tenha indicado um bom ajuste entre os dados observados e simulados, a linearidade apresenta o coeficiente angular da regressão significativamente inclinado, indicando que os parâmetros desconhecidos do modelo não são bem retratados nessa relação. Os resultados da análise comparativa mostraram que o modelo superestimou muito os valores observados, conforme indicado pelos indicadores Pbias e REQM.

Esse resultado pode estar associado a algumas limitações da metodologia utilizada. O método considera apenas o uso e ocupação do solo como indicador para determinar as cargas de SST, pressupondo que toda carga produzida na bacia se desloca e se acumula na rede de drenagem por ação da gravidade. Esse pressuposto pode ter afetado o desempenho do modelo, visto que existem muitos outros fatores associados a dinâmica de sedimentos em bacias hidrográficas, como grau de declividade, zonas de deposição, precipitação, características de solos, entre outros. O modelo não considera o transporte de sedimentos por meio do escoamento superficial e nem a taxa de entrega pixel a pixel, que geralmente está associada a declividade e cobertura do solo.

Outro fator associado ao baixo desempenho do método utilizado são os coeficientes de exportação de SST, que não foram representativos para a BHRL. Esses foram desenvolvidos para as sub-bacias de contribuição do reservatório de Guarapiranga, localizada na região metropolitana de São Paulo (SMA, 2010). Nesse trabalho, optou-se por utilizar os coeficientes do MQUAL 1.5 pois são os mais próximos da área de estudo e, possivelmente, podendo apresentar maior similaridade no que se refere aos aspectos hidrossedimentológicos.

Limitações também podem estar associadas aos dados observados na BHRL. Nessa pesquisa, utilizou-se apenas dados correspondentes a 1 ano de coleta e, em alguns pontos devido aos efeitos da sazonalidade da região e características dos cursos hídricos, não foi possível medir dados de vazão para os 12 meses do ano. A utilização de séries mais longas pode alterar desempenho do método utilizado.

5 - CONCLUSÕES

A abordagem empírica utilizada nesse trabalho não foi capaz de prever a carga de SST nos cursos hídricos da BHRL. Embora o modelo tenha conseguido identificar as áreas críticas da bacia, do ponto de vista de exportação de sedimentos em suspensão, e tenha apresentado um bom ajuste com os dados observados em campo ($r^2 = 0,92$), a análise comparativa mostrou que o modelo superestimou os dados observados, com valor de Pbias = 1208,66% e REQM = 719 ton.ano⁻¹. Em termos de desempenho, a metodologia utilizada não foi consistente para a BHRL.

6 - BIBLIOGRAFIA

- ARROIO JUNIOR, P. P. (2013). *Avaliação da produção e transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Itaqueri, município de Itirapina e Brotas – SP*. Dissertação (mestrado). EESC-USP, São Carlos-SP, 134 p.
- Annandale, G. W. (2006). *Reservoir sedimentation*. Encyclopedia of Hydrological Sciences. <https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa086>
- ANJINHO, P. S. (2019). *Modelagem distribuída da poluição pontual e difusa dos sistemas hídricos da bacia hidrográfica do ribeirão do Lobo, Itirapina-SP*. Dissertação (mestrado). EESC-USP, São Carlos-SP, 135 p.
- BORRELLI, P.; ROBINSON, D. A.; FLEISCHER, L. R.; LUGATO, E.; BALLABIO, C.; ALEWELL, C.; BAGARELLO, V. (2017). *An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion*. Nature communications, 8(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- FU, B.; MERRITT, W. S.; CROKE, B. F.; WEBER, T. R.; JAKEMAN, A. J. (2019). *A review of catchment-scale water quality and erosion models and a synthesis of future prospects*. Environmental modelling & software, 114, 75-97. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.12.008>
- HOU, D.; BOLAN, N. S.; TSANG, D. C.; KIRKHAM, M. B.; O'CONNOR, D. (2020). *Sustainable soil use and management: An interdisciplinary and systematic approach*. Science of The Total Environment, 138961. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138961>
- HUTCHINSON, M. F. (1989). *A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits*. Journal of hydrology, 106(3-4), 211-232. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90073-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90073-5).
- JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. (1988). *Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis*. Photogrammetric engineering and remote sensing, 54(11), 1593-1600.
- LIMA, R. N.; DE MELO RIBEIRO, C. B.; BARBOSA, C. C. F.; FILHO, O. C. R. (2016). *Estudo da poluição pontual e difusa na bacia de contribuição do reservatório da usina hidrelétrica de Funil utilizando modelagem espacialmente distribuída em Sistema de Informação Geográfica*. Eng Sanit Ambient, 21(1), 139-150. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41520201600100127676>
- MORUZZI, R. B.; DA CONCEIÇÃO, F. T.; DE SOUZA SARDINHA, D.; HONDA, F. P.; NAVARRO, G. R. B. (2012). *Avaliação de cargas difusas e simulação de autodepuração no córrego da Água Branca, Itirapina (SP)*. Geosciences, 31(3), 447-458.
- SMA. Secretaria Estadual do Meio Ambiente. (2010). *Elaboração do Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental da Bacia Hidrográfica do Reservatório Billings*. Relatório Final. Processo N° 7097/2007, Contrato SMA/CPLEA N° 09/2007, São Paulo.
- VALERIANO, M.; De FÁTIMA ROSSETTI, D.; DE ALBUQUERQUE, P. C. G. (2009). *TOPODATA: desenvolvimento da primeira versão do banco de dados geomorfométricos locais em cobertura nacional*. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, São José dos Campos: INPE, p. 5499-5506.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).