



SIMULAÇÃO DO FLUXO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM TRECHO DO RIO DOCE

Krishna Daher Sodré Campana¹; Daniel Rigo².

ABSTRACT – Knowing the behavior of the hydrosedimentological cycle is essential for good management of water resources. The study of the sediment flow admits the diagnosis of possible impacts over time, becoming an environmental indicator. According to recent research, the Rio Doce, located between the states of Minas Gerais and Espírito Santo, undergoes great processes of modification of the landscape, still little understood. It is necessary to understand the dynamics of the flow and the processes of sediment erosion and deposition in the region. Most simulation models for sediment transport in canals are unidimensional and allow understanding the evolution of the river. In this context, the objective of this paper was to simulate and evaluate the transport of flows and sediments in the stretch of the Doce River using HEC-RAS. The results were compared to those observed and simulated, using three sediment transport equations: Engelund and Hansen (1967), Ackers and White (1973), and Yang (1973), as well as different Manning coefficients. Among the equations, Engelund and Hansen (1967) was better suited to the section, along with Manning's coefficient of 0.029, for main gutter, and 0.055, for the margins. The program was able to simulate total sediment discharge, maximum sediment transport capacity and erosion/sedimentation in the riverbed. It was possible to observe that the studied section shows a greater tendency to sedimentation.

Palavras-Chave – Transporte de sedimentos, Modelagem Computacional, HEC-RAS.

1) Mestranda do Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental – Bolsista CNPq – Universidade Federal do Espírito Santo, Av. Fernando Ferrari, 514 - Goiabeiras, Vitória - ES, 29075-073, krishnadaher@gmail.com. (27) 99589-2685.

2) Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Ambiental, rigo@npd.ufes.br.



1 - INTRODUÇÃO

Conhecer o comportamento do ciclo hidrossedimentológico é essencial para uma boa gestão e suporte aos recursos hídricos. O estudo do fluxo de sedimentos ainda permite realizar um diagnóstico de possíveis impactos ao longo do tempo, tornando-se um indicador ambiental (Crispim *et al.*, 2015).

Conforme o levantamento registrado pelo PIRH (2010), 58% de área da bacia do rio Doce está classificada em uma zona de suscetibilidade erosiva forte. O estudo indicou que grande parte dos sedimentos erodidos é depositada nas baixas vertentes e planícies de inundação, apontando que seriam necessários estudos detalhados para quantificar o transporte de material pela erosão acelerada, e que se depositam nos principais canais de drenagem.

Existem softwares para a modelagem de transporte de sedimentos em rios e canais, onde é possível reproduzir os processos que ocorrem no sistema fluvial real em um ambiente controlado, podendo prever as mudanças batimétricas ao longo do tempo (Bilal *et. al*, 2017). Os modelos unidimensionais simulam a alteração vertical em canais, indicando erosão ou sedimentação nas seções transversais, avaliando assim a capacidade de transporte de sedimentos (Gibson *et. al*, 2015).

Na mesma vertente, pesquisas têm sido realizadas utilizando modelos computacionais para análise de transporte de sedimentos em trechos de rios, obtendo resultados satisfatórios utilizando, como exemplo, o software HEC-RAS (Dysarz, Szalkiewicz e Wicher-Dysarz, 2017; Song, Schmalz e Fohrer, 2015; Nazir *et. al*, 2016).

Nesse contexto, são apresentadas simulações computacionais em um trecho do rio Doce utilizando HEC-RAS, a fim de conhecer o mecanismo do fluxo e transporte de sedimentos.

2 - METODOLOGIA

A Bacia Hidrográfica do rio Doce se localiza no Sudeste do Brasil, abrangendo os Estados de Minas Gerais (86%) e Espírito Santo (14%), com área de 83.465 km² e extensão de 853 km. Possui três Unidades Regionais: Alto, Médio e Baixo rio Doce. A Unidade Regional do Baixo rio Doce apresenta morfologia com variação de oeste para leste de colinas, tabuleiros e planície costeira, com altitudes variadas decrescendo em direção ao canal principal e à planície costeira (Coelho, 2007). O trecho escolhido para o estudo se localiza em Itapina, distrito do município de Colatina – ES (Figura 1).

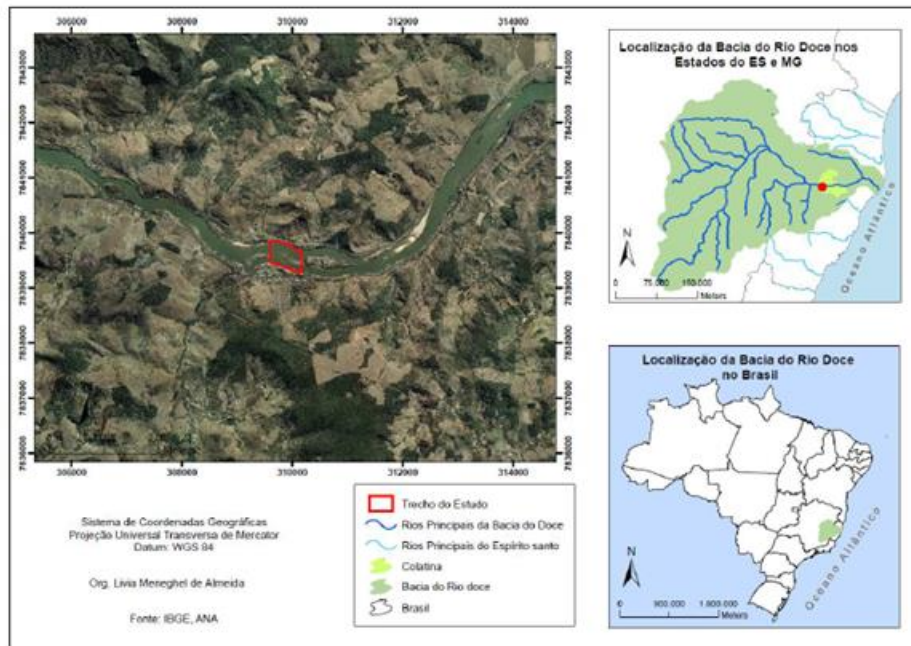


Figura 1 - Localização do trecho de estudo do rio Doce (fonte: Almeida, 2012).

Para realizar a análise de transporte de sedimentos, foi utilizado o programa HEC-RAS 5.0, com apoio da extensão HEC-GeoRAS e ArcMap na elaboração de mapas geométricos. O programa HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) é um modelo gratuito que foi desenvolvido pelo Corpo de Engenharia da Marinha dos EUA e, desde a versão de 4.1(2007), permite a simulação de transporte unidimensional de sedimentos em trechos de rios e canais, onde é possível estimar as consequências de modificações do leito (USACE, 2016).

O modelo foi calibrado com dados obtidos em dezembro de 2011 e fevereiro de 2012, utilizando 3 equações de transporte de sedimentos: Engelund e Hansen (1967), Ackers e White (1973) e Yang (1973). Foram utilizados dados de topobatimetria, coeficientes de Manning, declividade da linha d'água, vazão média diária, vazão de sedimentos, granulometria e temperatura. Para dados de vazão, foram obtidas as vazões médias diárias da estação da Agência Nacional de Águas (ANA), localizada em Colatina. Os demais dados foram de trabalhos anteriores de Almeida (2012) e Brune (2014), que estudaram a mesma região. Para validar o modelo, foram comparadas as cotas do perfil observadas com as simuladas em HEC-RAS utilizando o coeficiente de correlação e determinação. Após a verificação do melhor ajuste, foi realizado o prognóstico das condições de descarga total de sedimentos, capacidade de transporte e erosão/sedimentação em dezembro de 2011 a fevereiro de 2012.



3 - RESULTADOS

A figura 2 apresenta as vazões médias diárias obtidas pela estação de Colatina – ES, nos quais foram utilizados os valores entre os períodos de dezembro de 2011 a fevereiro de 2012 para a simulação do modelo.

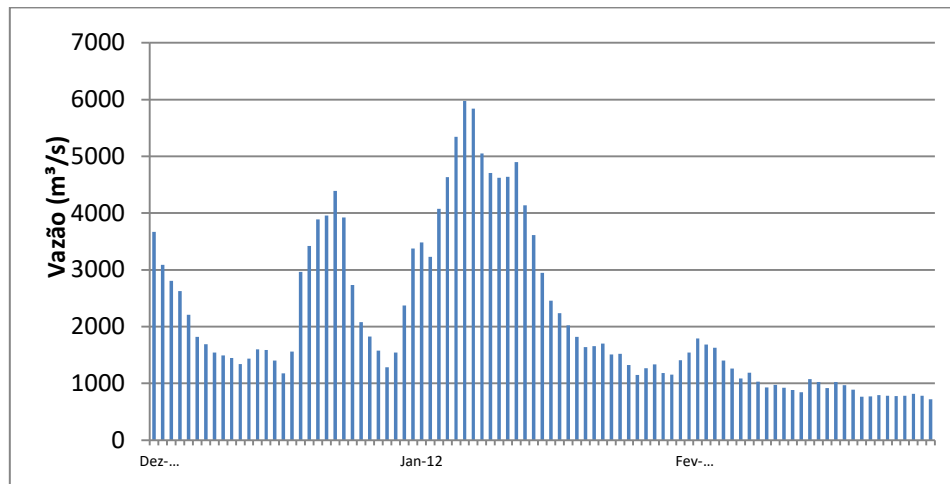


Figura 2 – Dados de vazões médias diárias coletadas pela estação de Colatina (fonte: autoria própria).

A figura 3 apresenta a última comparação das elevações do perfil longitudinal obtidas na batimetria observada em 24/02/2012, com a situação simulada para as mesmas datas em HEC-RAS. A melhor configuração para o trecho do rio Doce foi o coeficiente de Manning de 0,029, para calha, e 0,055, para as margens, utilizando a equação de transporte de Engelund e Hansen (1967). As demais equações não produziram bons ajustes. Segundo Julien (1995), um leito de rio com configuração de dunas, como é o caso do rio Doce, possui características de coeficientes variando entre 0,020 a 0,040. Destaca-se que, à medida que se propagavam os dias de simulação, a correlação entre as batimetrias reduziam. Entretanto, como a análise foi em um período de dois meses, a simulação atendeu aos critérios para análise de transporte de sedimentos de acordo com os valores obtidos de correlação e determinação. Os coeficientes foram considerados fortes para todos os períodos analisados, com $r = 0,93$ e $R^2 = 0,87$ em 16/12/2011, $r = 0,90$ e $R^2 = 0,81$ em 10/02/2012, e $r = 0,85$ e $R^2 = 0,73$ em 24/02/2012.

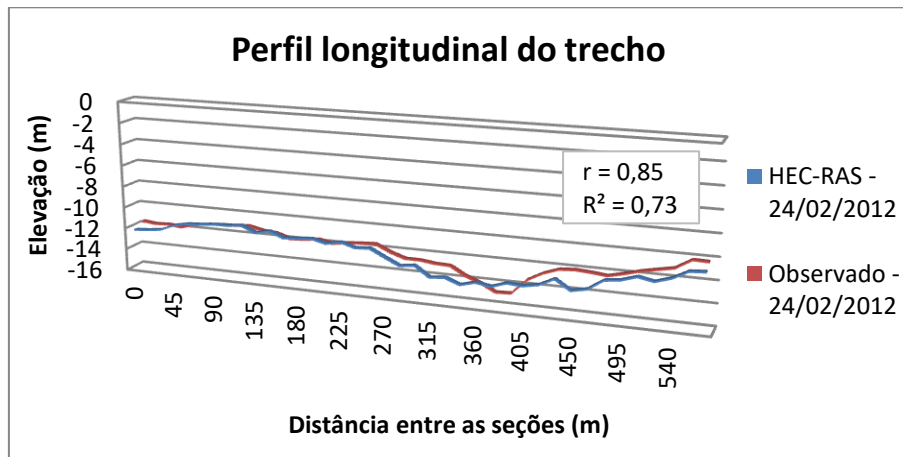


Figura 3 – Perfil longitudinal do trecho do rio na versão observada e modelada em HEC-RAS para 24/02/12 (fonte: autoria própria).

Após o ajuste de melhores parâmetros e validação do modelo, foram obtidas as simulações para avaliar as condições de descarga total de sedimentos (Figura 4), capacidade máxima de transporte total (Figura 5) e condições do leito de erosão/sedimentação no trecho do rio Doce (Figura 6) para dezembro de 2011 a fevereiro de 2012. Nota-se na figura 4 que a descarga total de sedimentos ocorre em maior proporção para o dia 02/12/2011, atingindo a máxima de 27.401,54 toneladas/dia, reduzindo em 24/02/2012, justamente com a diminuição da vazão. A Tabela 1 apresenta os valores mínimos, máximos e médios na seção para todos os períodos analisados.

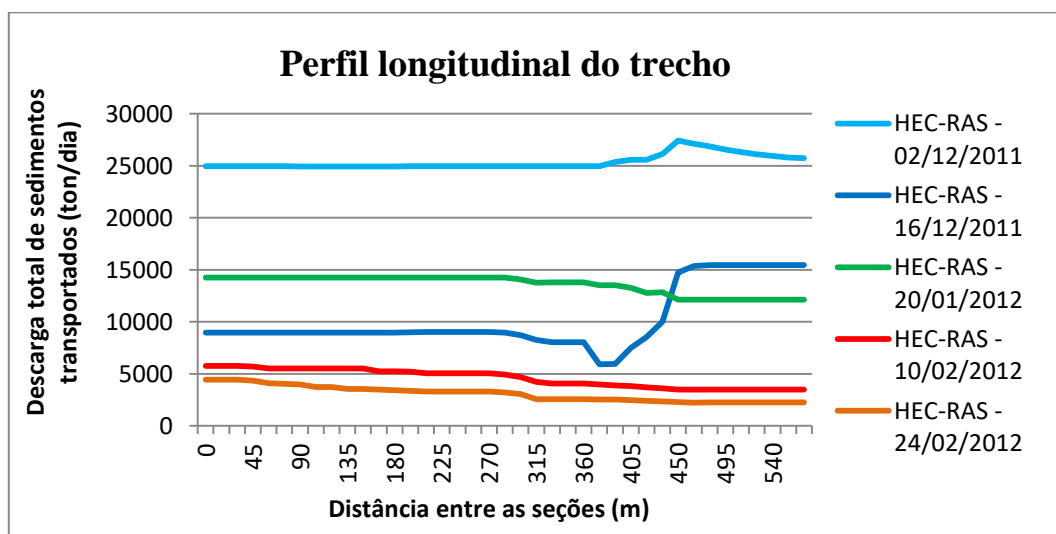


Figura 4 – Descarga total de sedimentos (ton/dia) (fonte: autoria própria).



Tabela 1 – Valores mínimos, máximos e médios de descarga total de sedimentos no trecho do rio Doce.

(ton/dia)	Período analisado				
	02/12/2011	16/12/2011	20/01/2012	10/02/2012	24/02/2012
Mínimo	24.935,60	5.920,72	12.119,78	3.476,09	2.226,28
Máximo	27.401,54	15.432,67	14.239,13	5.762,29	4.427,81
Média	25.357,59	10.166,55	13.563,09	4.581,02	3.071,42

A concentração de sedimentos atingiu 127,13 mg/L. De acordo com um estudo realizado no rio Doce, esses valores chegavam próximos a 200 mg/L, sendo considerados elevados (Christofolletti, 1981). Já a capacidade máxima de transporte de sedimentos variou entre valores de 2.219,75 toneladas/dia a 10.839.420,00 toneladas/dia, aumentando consideravelmente ao final da última seção. Fagundes *et al.* (2017) encontraram valores entre 31 ton/dia a 7.800.000 ton/dia para cada trecho do rio Doce em cada minibacia utilizando o modelo MGB-SED, sendo um software utilizado para análise em planícies de inundação. Entretanto, foi utilizada a equação de Yang (1973).

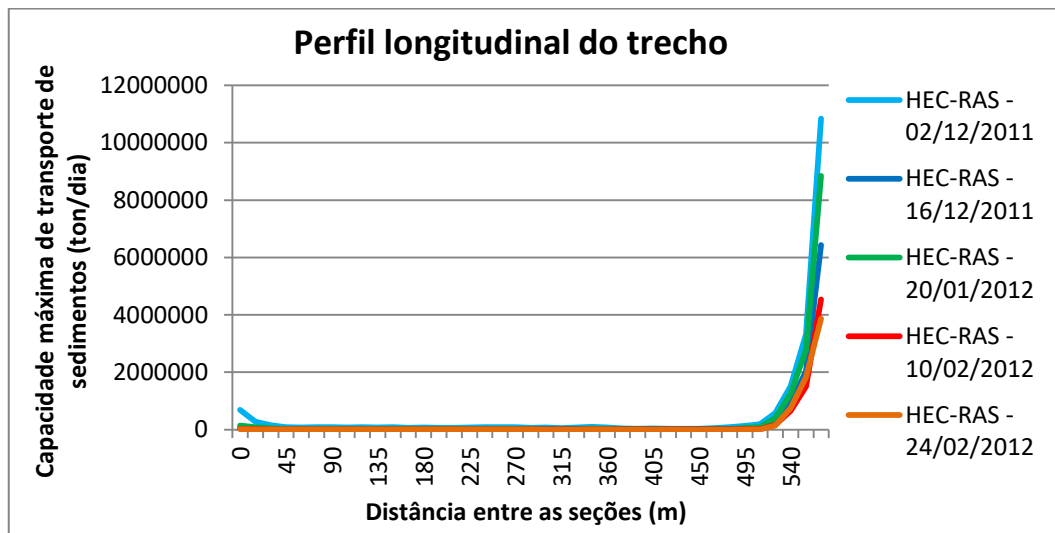


Figura 5 – Capacidade máxima de transporte de sedimentos (ton/dia) (fonte: autoria própria).

Tabela 2 – Valores mínimos, máximos e médios da capacidade máxima de transporte total de sedimentos no trecho do rio Doce.

(ton/dia)	Período analisado				
	02/12/2011	16/12/2011	20/01/2012	10/02/2012	24/02/2012
Mínimo	29.370,23	5.792,77	12.025,91	3.465,63	2.219,75
Máximo	10.839.420,00	6.435.253,00	8.839.436,00	4.540.067,00	3.863.050,00
Média	506.002,27	261.680,86	367.558,04	182.733,04	172.779,72



Em seguida é apresentado o balanço de erosão (valores negativos)/sedimentação (valores positivos) no leito. Como pode ser observado no gráfico da figura 6, o trecho possui uma tendência à sedimentação para quase todos os períodos analisados. Observa-se que no início da simulação (02/12/2011) não houve nenhuma alteração, mas a partir do dia 16/12/2011, o modelo foi apresentando condições de deposição. Em 10/02/2012 é gerada uma erosão, que pode ser justificada em consequência das altas vazões que ocorreram nos meses de dezembro e janeiro, obtendo-se uma maior descarga de sedimentos.

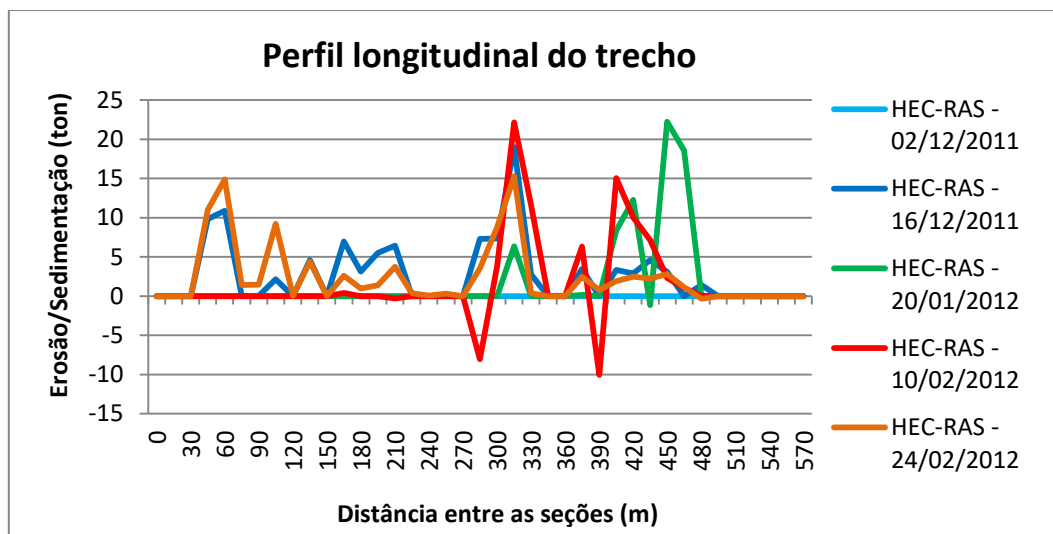


Figura 6 – Balanço de erosão/sedimentação no trecho do rio Doce (fonte: autoria própria).

4 - CONCLUSÃO

O modelo, após ajuste de configurações, se apresentou apropriado para avaliar o trecho do rio Doce diante das comparações dos gráficos de elevação do perfil longitudinal entre os dados observados e simulados, indicando forte correlação. Os parâmetros foram validados para um coeficiente de Manning de 0,029, na calha, e 0,055, para as margens, obtendo os melhores resultados com a equação de transporte de Engelund e Hansen (1967). A descarga e capacidade máxima de transporte de sedimentos foram maiores para dezembro, quando comparados os valores do mês de fevereiro, em decorrência ao aumento da vazão. Na simulação para avaliar condições do leito, houve uma tendência maior à sedimentação. Sendo assim, o programa HEC-RAS atendeu ao objetivo proposto, conseguindo reproduzir as alterações na calha próximo à realidade e, assim, prever o transporte de sedimentos ao longo do tempo analisado. Foi encontrada a melhor configuração para análise de transporte diante das características do rio, podendo ser aplicada a outras regiões semelhantes em futuros estudos.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, L. M. (2012). *“Análise de metodologias para o cálculo da descarga de fundo, aplicada ao rio Doce, ES”*. 151f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.
- BILAL, A.; DAI, W.; LARSON, M.; BEEBO, Q. N.; XIE, Q. (2017). *“Qualitative simulation of bathymetric changes due to reservoir sedimentation: A Japanese case study”*. Plos One, v.12, p.1-18.
- BRUNE, R. A. (2014). *“Métodos de estimativa de descarga sólida em rios – análise comparativa”*. 147f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.
- CRISPIM, D. L.; ISMAEL, L. L.; DE SOUZA, T. M. I.; GARRIDO, J. W. A.; DE QUEIROZ, M. M. F. (2015). *“Transporte e caracterização de sedimentos de fundo no rio Piranhas em uma seção de controle próximo à sede do município de Pompa – PB”*. Revista Holos. v.3, p.93-101.
- COELHO, A. L. N. (2007). *“Alterações hidrogeomorfológicas no médio-baixo rio Doce/ES”*. 227f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação do Departamento de Geografia da Universidade Federal Fluminense, Niterói.
- GIBSON, S.; SIMON, A.; LANGENDOEN, E.J.; BANKHEAD, N.; SHELLEY, J. (2015). *“A physically-based channel-modeling framework integrating HEC-RAS sediment transport capabilities and the USDA-ARS bank-stability and toe-erosion model (BSTEM)”* in Proc. 3rd Joint Federal Interagency Sedimentation and Hydrologic Modeling Conference, Reno/NV, Abril 2016, pp. 1-12.
- FAGUNDES, H. O.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C. (2017). *“Simulação Hidrossedimentológica Preliminar na Bacia do rio Doce com o modelo MGB-SED”*. In Anais do II Congresso Internacional de Hidrossedimentologia, Porto Alegre/RS, Jun 2017, pp. 1 - 8.
- NAZIR, M. H. M.; AWANG, S.; SHAABAN, A. J.; YAHAYA, N. K. E. M.; JUSOH, A. M.; ARUMUGAM, M. A. R. M. A.; GHANI, A. A. (2016). *“Sediment Transport Dynamic in a Meandering Fluvial System: Case Study of Chini River”*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. v.136, p.1-11.
- PIRH. (2010). *“Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio doce e planos de ações para as unidades de planejamento e gestão de recursos hídricos no âmbito da bacia do rio doce”*. Relatório final. Consórcio EcoPLAN-Lume. v.1, p. 472.
- SONG, S.; SCHMALZ, B.; FOHRER, N. (2015). *“Situation, quantification and comparison of in-channel and floodplain sediment processes in a lowland area – A case study of the Upper Stör catchment in northern Germany”*. Ecological Indicators. v.57, p.118-127.
- USACE, United States Army Corps of Engineers. (2016). *“User’s Manual”*. Hydrologic Engineering Center.