

MODELAGEM DE SEDIMENTOS NA BACIA DO RIO GUAPORÉ-RS

DELA COSTA, F. P. ¹; ALMEIDA, G. P. M. ²; BALDOTTO, J. B. ³; BUARQUE, D. C. ⁴; RODRIGUES, M.F. ⁵

ABSTRACT – Erosion leads to a reduction in the cultivable depth and its fertility, in addition to silting rivers, estuaries and reservoirs. Its mathematical representation is an important tool for the management and planning of soil and water conservation. The Guaporé river watershed, located in the northeast region of the Rio Grande do Sul State, Brazil, has a high capacity for transference and connectivity between sediment sources and river network. Its soils are very susceptible to erosion and the croplands are the main source of sediment. Besides that, the hydrosedimentological processes of the watershed are complex and difficult to be evaluated due to the heterogeneity of soils, relief and use. The objective of the work was to evaluate the efficiency of the MGB-SED model to predict of the flow and to evaluate the efficiency in the prediction of the suspended solid discharge, the spatial distribution of erosion and the sediment transport. The model efficiently represented the hydrological behavior and the spatial distribution of sediment production of the basin and the solid discharge of sediments suspended in rivers. Being very useful in future studies to assess water availability and sediment production.

Palavras-Chave – MGB-SED, descarga sólida, distribuição espacial.

1 - INTRODUÇÃO

A erosão conduz à redução da profundidade de solo cultivável e de sua fertilidade (Morgan, 2005). Os sedimentos erodidos nas áreas de encosta podem atingir os cursos de água e causar o assoreamento de rios, estuários e reservatórios.

A representação matemática dos processos erosivos é uma importante ferramenta que auxilia na gestão e no planejamento da conservação do solo e da água, uma vez que diferentes práticas de controle de erosão podem ser avaliadas por meio da simulação de uso e manejo do solo, incluindo as mudanças climáticas (Minella *et al.*, 2010).

A bacia hidrográfica do rio Guaporé, situada na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul, abrange as regiões fisiográficas do planalto e do rebordo do planalto. Os processos hidrossedimentológicos são complexos e difíceis de serem avaliados devido à heterogeneidade de solos, de relevo e de uso e cobertura da terra. Os solos dessa bacia são muito susceptíveis à erosão (Tiecher, 2015) e têm como principal fonte de sedimentos as terras cultivadas (Tiecher *et al.*, 2017). Os grandes volumes de sedimentos em suspensão, medidos nos rios, são provenientes

¹) Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Av. Fernando Ferrari, 514 - Goiabeiras, Vitória - ES, frandelacosta@gmail.com, 27 33352853

²) Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Av. Fernando Ferrari, 514 - Goiabeiras, Vitória - ES, gabriellapassamani@gmail.com, 27 33352853

³) Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Av. Fernando Ferrari, 514 - Goiabeiras, Vitória - ES, jbbaldotto@hotmail.com, 27 33352853

⁴) Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Av. Fernando Ferrari, 514 - Goiabeiras, Vitória - ES, diogo.buarque@gmail.com, 27 33352853

⁵) Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Av. Roraima, 1000 – Camobi, Santa Maria - RS, miriamf.solos@gmail.com

das perdas de solo em lavouras, estradas, construções civis, entre outros, e a bacia hidrográfica do rio Guaporé possui alta capacidade de transferência e conectividade entre as fontes e a rede de drenagem (Tiecher, 2015). Devido a tais particularidades, a bacia vem sendo monitorada desde 2011.

Apesar do monitoramento de uma bacia ser a principal fonte de informações sobre os processos que ocorrem na mesma, os modelos matemáticos são ferramentas complementares importantes. A utilização de modelos permite quantificar e analisar possíveis impactos ambientais decorrentes de processos hidrossedimentológicos. O modelo *Soil And Water Assessment Tool – SWAT* (Arnold *et al.*, 1998), por exemplo, é capaz de reproduzir os resultados de campo na estimativa de vazão e da produção de sedimentos na bacia do rio Guaporé, após calibrado (FENSTERSEIFER, 2014), sendo uma importante ferramenta para auxílio na detecção de quais usos da terra irão acarretar menor perda de solo na bacia.

A modelagem hidrossedimentológica tem sido uma boa alternativa para avaliar a erosão e o transporte de sedimento de forma distribuída, utilizando-se de modelos como *Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation - ANSWER* (Beasley *et al.*, 1980), *SWAT* (Arnold *et al.*, 1998), *Large Scale Catchment - LASCAM* (Viney e Sivapalan, 1999), *Water Availability in Semi-Arid environments - WASA-SED* (Mueller *et al.*, 2010) e o Modelo de Geração e Transporte de Sedimentos em Grandes Bacias - *MGB-SED* (Buarque, 2015). O modelo *MGB-SED* (Buarque, 2015; Fagundes, 2018, Föeger *et al.*, 2019;) acoplado ao modelo hidrológico distribuído de grandes bacias *MGB* (Collischonn *et al.*, 2007; Paiva *et al.*, 2011; Pontes *et al.*, 2017). Além de ter sido desenvolvido para aplicações em grandes bacias, o *MGB-SED* possui poucos parâmetros e necessita de poucos dados de entrada (Buarque, 2015), e teve resultados satisfatórios, quando aplicado em bacias, tais como na bacia do rio Madeira (Buarque, 2015), na bacia do rio Doce (Fagundes, 2018; Fagundes *et al.*, 2020) e na bacia Amazônica (Föeger *et al.*, 2019).

Como forma de complementar as informações obtidas a partir de dados de monitoramento da bacia do rio Guaporé-RS, este estudo buscou avaliar a eficiência do uso do modelo *MGB-SED* na predição de vazão na bacia, bem como avaliar a eficiência na predição da descarga sólida em suspensão, da distribuição espacial da geração de sedimentos na bacia e do transporte de sedimentos.

2 - ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Guaporé (Figura 1) possui área de drenagem de aproximadamente 2.500 km² e está localizada no Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas de Latitude de 28°14'26,9" Norte e 28°58'02" Sul e Longitude de 51°54'59" Leste e 52°22'55,71" Oeste (Fensterseifer, 2014). Os principais afluentes do rio Guaporé são os rios Capingui, Guaporé, Anta Gorda, Carreiro e Arroio Marau.

A elevação varia entre 206 m e 832 m (Fensterseifer, 2014). O clima predominante na região é o subtropical úmido, de acordo com a classificação de Köppen. O sul da bacia possui pequenas propriedades com agricultura familiar, em função do relevo acidentado e a região norte, com relevo que facilita o processo de mecanização, predominam cultivos de milho e soja.

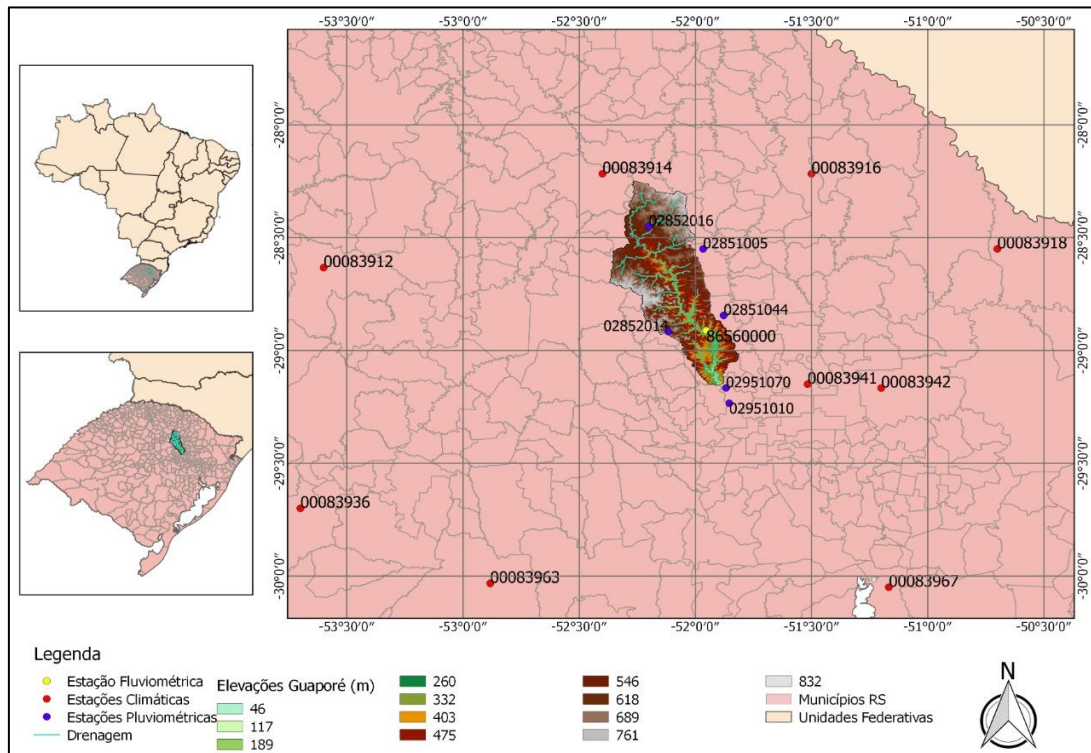


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Guaporé, no Estado do Rio Grande do Sul.

A geração anual de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Guaporé foi de $1,40 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, para os anos de 2011 e 2012 sendo os cultivos agrícolas a maior fonte de contribuição de sedimentos ao rio Guaporé, identificada pelo método *fingerprinting* (Tiecher *et al.*, 2017).

3 - METODOLOGIA

O comportamento da vazão (2000 - 2015) e da descarga sólida em suspensão (2011 - 2014) na bacia hidrográfica do rio Guaporé foi representado por meio da aplicação do modelo MGB-SED (Buarque, 2015; Fagundes, 2018, Föeger *et al.*, 2019). O MGB-SED utiliza o módulo hidrológico com a discretização de bacia em minibacias e adota o conceito de Unidade de Resposta Hidrológica (Buarque, 2015), para realizar a propagação do escoamento até a rede de drenagem. A propagação de vazões em rios foi simulada por meio do método de Muskingum-Cunge (Collischonn e Tucci, 2001).

Para a definição da bacia e extração de suas características físicas foi utilizado o modelo digital de elevação – MDE da região, obtido do Consórcio CGIAR⁶, com resolução espacial de 90

⁶ <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>

metros. Dados de tipo de solo e uso e cobertura da terra foram obtidos a partir do mapa de Unidade de Resposta Hidrológica - URH (Fan *et al.*, 2015).

Dados de precipitação pluvial, necessários para a simulação hidrológica, foram obtidos de seis postos pluviométricos da Agência Nacional de Águas (ANA) para o período de 01/01/2000 a 31/12/2015 (Figura 1). Os dados de clima foram adquiridos de normais climatológicas do período 1960-1990 da base interna do MGB, realizadas pelo INMET (Figura 1). Dados de vazão da estação 86560000 - Linha Colombo (Figura 1) foram usados para calibração do módulo hidrológico, devido a sua disponibilidade de dados monitorados no período idêntico aos dados de precipitação.

Dados de concentração de sedimentos em suspensão foram utilizados para calibração do módulo de sedimentos. Dados medidos diariamente foram adquiridos junto a integrantes do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria-RS, no âmbito do projeto "Água e poluentes, das lavouras às cidades: avaliação e tecnologias melhoradas de manejo em rede de bacias hidrográficas (Edital FAPERGS nº 008/2009, Processo no 10/0034-0)", financiado pelo Programa de Apoio a Núcleos de Excelência – PRONEX da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul – FAPERGS.

A calibração do modelo hidrológico foi realizada para o período de 01/01/2006 a 31/12/2015, por meio do ajuste dos parâmetros calibráveis de solo, como o escoamento subsuperficial e subterrâneo, o tempo de propagação de escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo. A validação foi realizada para o período de 01/01/2000 a 31/12/2005.

A calibração do módulo de sedimentos foi realizada com o ajuste dos coeficientes α e β da equação da MUSLE (Williams, 1975), adotada pelo MGB-SED (Buarque, 2015; Föeger, 2019) para estimar a geração de sedimento na bacia. A calibração do modelo de sedimentos seguiu a metodologia proposta por Fagundes (2018) e foi realizada para o período entre 01/01/2013 e 25/10/2014. A validação foi realizada no período de 01/01/2011 a 31/12/2012. O fator LS foi obtido a partir do MDE (Buarque, 2015), os fatores C, P tiveram por base o trabalho de Zamprogn (1999) para cada classe de uso do solo do mapa de URH, enquanto que o fator K foi estimado com base nos percentuais de área, silte, argila e carbono orgânico de cada solo, obtidos por integrantes do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria-RS.

A eficiência do modelo para a predição da vazão e da descarga sólida em suspensão foi avaliada com base no coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (Nash), do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe entre os logaritmos dos dados simulados e os observados (Nash-Log) e do erro relativo de volume total (Bias). Além desses indicadores estatísticos, o coeficiente de correlação de Pearson (r) e o coeficiente de determinação (r^2) foram utilizados para avaliar a eficiência do modelo na predição dos sedimentos.

4 - RESULTADOS

O comportamento hidrológico foi semelhante entre os dados observados e os simulados pelo modelo hidrológico MGB (Figura 2), o que indica que a calibração foi eficiente e o modelo representa o comportamento hidrológico da bacia. O adequado desempenho do modelo hidrológico no período de validação é indicado pelos coeficientes Nash (0,71) e Nash-Log (0,76), cujos valores são considerados muito bons (Moriassi *et al.*, 2007). A distribuição temporal da descarga sólida em suspensão simulada pelo MGB-SED se assemelha à observada nos períodos de calibração (Figura 3) e de validação, com coeficiente Nash de 0,55, classificado como satisfatório (Moriassi *et al.*, 2007) e 0,46, respectivamente. Os coeficientes de determinação e de correlação foram superiores a 0,50, considerado como bom neste trabalho. O erro de volume foi de -0,19 no período de calibração e 0,31 no período de validação. A descarga sólida média anual no exutório da bacia é 214.943,69 toneladas pelos dados medidos, e foi estimada em 194.916,42 toneladas com a simulação.

Como observado na Figura 3, o MGB-SED não representa perfeitamente os picos da descarga sólida em suspensão no exutório da bacia, fato esse, que segundo Fagundes, Fan e Paiva (2019) pode ocorrer pela não representação de escorregamentos de massas ocorridos na bacia, que não são representados pelo modelo.

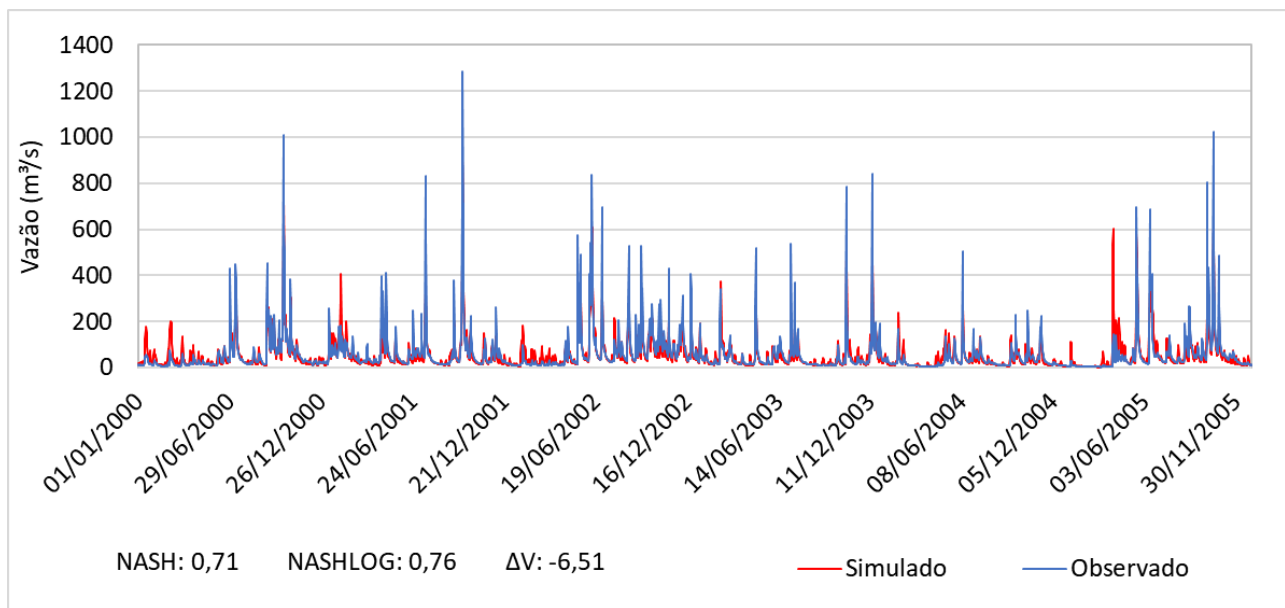


Figura 2 – Vazões simuladas e observadas para o período de validação na seção de monitoramento (estação 86560000 - Linha Colombo) da bacia hidrográfica do rio Guaporé, Rio Grande do Sul.

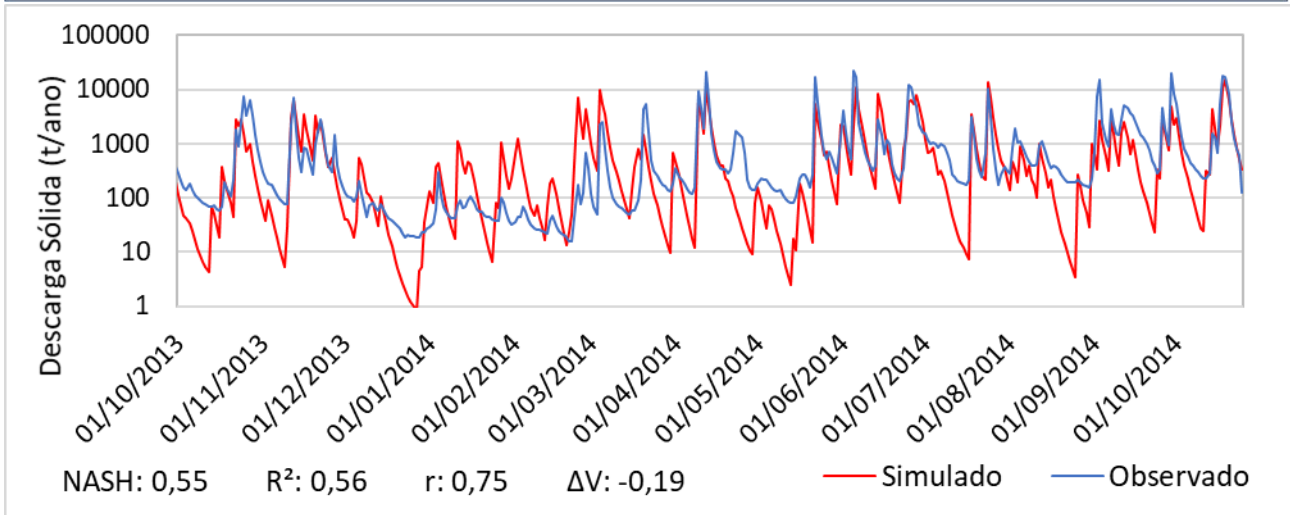


Figura 3 – Descargas sólidas em suspensão simuladas e observadas para o período de calibração na seção de monitoramento da bacia hidrográfica do rio Guaporé, Rio Grande do Sul.

Após a calibração e validação do MGB-SED na seção de monitoramento da bacia hidrográfica do rio Guaporé, buscou-se a representação da variabilidade espacial da carga total de sedimentos gerada em cada minibacia e que segue para a rede de drenagem (Figura 4a), bem como a descarga de sedimentos em suspensão em cada trecho da rede de drenagem (Figura 4b).

A distribuição das cargas de sedimentos geradas nas minibacias e nos trechos de rios pelo modelo está associada à influência conjunta dos fatores dos processos erosivos expressos pela equação da MUSLE. Para o local de estudo destaca-se a relação entre o fator topográfico LS (L são os valores de comprimento e S de declividade) e uso do solo por práticas agrícolas, predominante na região, uma vez que, são fatores que afetam diretamente as estimativas do modelo.

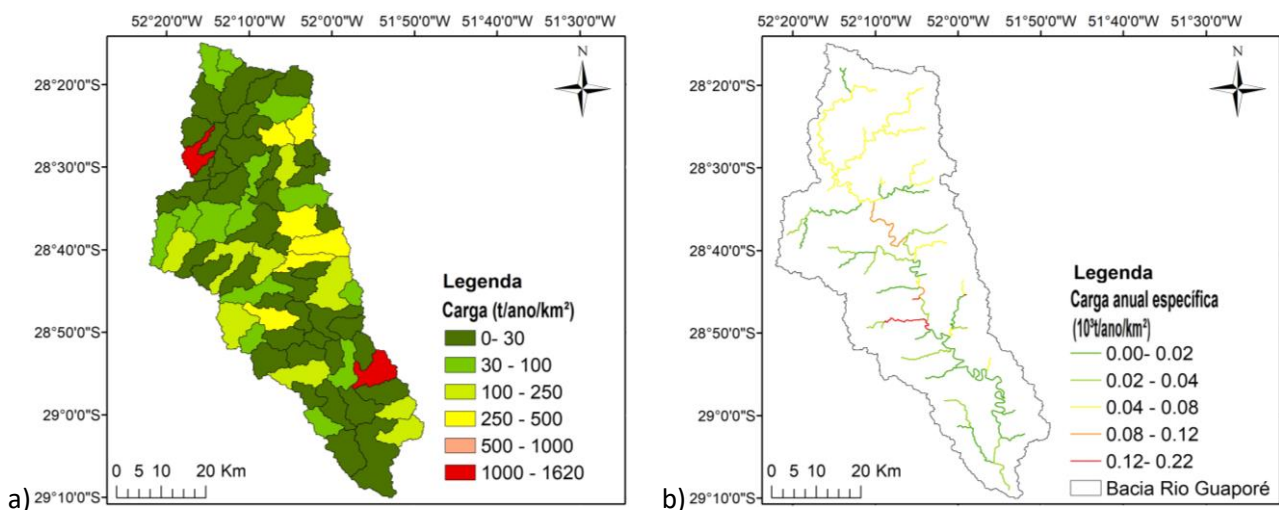


Figura 4 – Carga de sedimentos média anual específica geradas nas minibacias (a) e descarga média anual específica de sedimentos em suspensão por trecho de rio (b), simuladas na bacia hidrográfica do rio Guaporé-RS.

5 - CONCLUSÃO

O modelo foi capaz de representar eficientemente o comportamento hidrológico da bacia, sendo de grande utilidade para ser utilizado em estudos futuros para avaliar a disponibilidade hídrica na bacia. O modelo também representou de forma satisfatória a distribuição espacial da geração de sedimentos na bacia e a descarga sólida de sedimentos em suspensão nos rios, vez que, com o uso dessa ferramenta foi possível notar que altas cargas de sedimentos estão sendo geradas em minibacias de cabeceira, podendo tal fato, ser consequência da declividade local e do uso e cobertura da terra na bacia.

AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem o apoio Institucional da Universidade Federal do Espírito Santo-UFES, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul – FAPERGS pela cessão de dados e às instituições Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-CAPES e Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo-FAPES pelo apoio financeiro no desenvolvimento da pesquisa.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARNOLD, J.G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R.S.; WILLIAMS, J.R. “Large area hydrologic modeling and assessment – part 1: model development”. Water Resour. Assoc. 1998.

BEASLEY, D.B.; HUGGINS, L.F.; MONKE, E.J. (1980). “ANSWERS - a model for watershed planning”. Trans Am Soc Agric Eng, v.23, p.938 - 944.

BUARQUE, Diogo Costa. “*Simulação da Geração e do Transporte de Sedimentos em Grandes Bacias: Estudo de caso do rio Madeira*”. Tese (Doutorado) – Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

COLLISCHONN, W., ALLASIA, D., DA SILVA, B.C., TUCCI, C.E.M. (2007). “*The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling*”. Hydrological Sciences Journal, v.52, p.878 - 895.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. (2001). “*Simulação Hidrológica de Grandes Bacias*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.6, n.1, p.95 - 118.

FAGUNDES, H.de O.; FAN, F.M.; PAIVA, R.C.D.de. “Automatic calibration of a large-scale sediment model using suspended sediment concentration, water quality, and remote sensing data”. RBRH, v. 24, 2019.

FAGUNDES, H.O., PAIVA, R.C.D., FAN, F.M., BUARQUE, D.C., ANDRADE, A.C.F. (2020). “*Sediment modeling of a large-scale basin supported by remote sensing and in-situ observations*”. Catena, v.190, p.1 -13.FAGUNDES, Hugo Oliveira. “*Modelagem hidrossedimentológica de grandes bacias com apoio de dados in situ e sensoriamento remoto*”. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

FAN, F.M.; BUARQUE, D.C.; PONTES, P.R. M.; COLLISCHONN, W. “*Um Mapa de Unidades de Resposta Hidrológica para a América do Sul*” in Anais do XXI Simpósio Brasileiro e Recursos Hídricos, Brasília/DF, Nov 2015, p.1 - 8.

FENSTERSEIFER, S.L.B. 2014. *“Influência da Resolução Espacial do Pixel na Aplicação do Modelo de Simulação SWAT na Bacia Hidrográfica do Rio Guaporé, RS”*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria Centro de Ciências Rurais Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Santa Maria, RS, 2014.

FÖEGER, L.B.; BUARQUE, D.C.; PONTES, P.R.M.; FAGUNDES, H.O.; FAN, F.M. *“Modelagem hidrossedimentológica com propagação inercial de vazões”* in Anais do XXIII SBRH - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, Foz do Iguaçu/RS, Nov 2019, p.1 - 2.

MINELLA, J.P.G.; MERTEN, G.H.; RUHOFF, A.L. (2010). *“Utilização de métodos de representação especial para cálculo do fator topográfico na Equação Universal de Perda de Solo Revisada em bacias hidrográficas”*. Revista Brasileira de Ciências do Solo, v. 34, p.1455 - 1462.

MORGAN, R.P.C. (2005). *Soil erosion and conservation*. Blackwell Publishing, Australia, 316p.

MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W. (2007). *“Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations”*. Transactions Of The Asabe, v. 50, p.885 - 900.

MUELLER, E.N.; GÜNTNER, A.; FRANCKE, T.; MAMEDE, G. (2010). *“Modelling sediment export, retention and reservoir sedimentation in drylands with the WASASED model”*. Geoscientific Model Development, v. 3, n. 1, p.275 - 291.

PAIVA, R.C.D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. (2011). *“Large scale hydrologic and hydro-dynamic modeling using limited data and a GIS based approach”*. Journal of Hydrology, v. 406, p. 170 - 181.

PONTES, P.R.M.; FAN, F.M.; FLEISCHMANN, A.S.; PAIVA, R.C.D.; BUARQUE, D.C.; SIQUEIRA, V.A.; JARDIM, P.F.; SORRIBAS, M.V.; COLLISCHONN, W. (2017). *“MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS”*. Environmental Modelling & Software, v. 94, p. 1 - 20.

TIECHER, T. (2015). *Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no Sul do Brasil: contextualizando as atividades agropecuárias e os problemas erosivos*. Editora URI – Frederico Westph, RS, 152 p.

TIECHER, T.; MINELLA, J.P.G.; CANER, L.; EVRARD, O.; ZAFAR, M.; CAPOANE, V.; LE GALL M.; SANTOS, D. R. (2017). *“Quantifying land use contributions to suspended sediment in a large cultivated catchment of Southern Brazil (Guaporé River, Rio Grande do Sul)”*. Agriculture, Ecosystems & Environment, v.237, p.95 - 108.

VINEY, N. R.; SIVAPALAN, M. (1999). *“A conceptual model of sediment transport: application to the Avon River Basin in Western Australia”*. Hydrological processes, v. 743, n. May 1998, p.727 - 743.

WILLIAMS, J.R. (1975). *Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy fator*, in Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources, USDA Sedimentation Laboratory, Mississippi. 1975.

ZAMPROGNO, D.P. 1999. *“Subsídios para a definição de locais apropriados para a implantação de reservatórios de regularização de vazões: refinamento e aplicação de procedimento metodológico”*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Vitória. Vitória, 1999.