

Modelagem de sedimentos com reservatórios em escala continental

*Hugo de Oliveira Fagundes*¹; *Fernando Mainardi Fan*²; *Ayan Santos Fleischmann*³; *Rodrigo Cauduro Dias de Paiva*⁴; *Diogo Costa Buarque*⁵; *Vinicius Alencar Siqueira*⁶; & *Walter Collischonn*⁷

Palavras-Chave – MGB-SED; Erosão; América do Sul.

RESUMO

Os reservatórios são estruturas feitas pelo homem que tem contribuído para a redução dos sedimentos em diversos trechos de rios e conseqüentemente para os oceanos. O objetivo deste trabalho foi avaliar a performance de um modelo de sedimentos continental em representar os fluxos de sedimentos em suspensão e de leito, considerando a presença de 234 grandes reservatórios na América do Sul. Utilizou-se abordagens já utilizadas na literatura para representar as defluências de água dos reservatórios e a deposição dos sedimentos. Os resultados mostraram que a performance do modelo com reservatórios foi superior tanto para as vazões como para as descargas de sedimentos, especialmente para os rios com impactos significativos dos reservatórios, como no rio São Francisco e no rio Paraná.

INTRODUÇÃO

A erosão do solo tem aumentado em muitas regiões da Terra (Borrelli et al., 2017). Ao mesmo tempo Syvitski et al. (2005) mostraram que a presença dos reservatórios tem contribuído para uma significativa redução das descargas de sedimentos que chegam aos Oceanos em nível global. Além de interromper os fluxos de sedimentos, os reservatórios afetam a conectividade dos rios (Grill et al., 2019), o que implica em afetar os ecossistemas (Barbarossa et al., 2020), os ciclos biogeoquímicos (Forsberg et al., 2017) e os deltas dos rios (Best, 2019).

No que tange a América do Sul (AS), foco do presente trabalho, o continente transporta significativas cargas de sedimentos em comparação com outros locais do planeta (Latrubesse et al., 2005). Por um lado, segundo Borrelli et al. (2017), as taxas de erosão na AS tem aumentado em muitos locais, com taxas que ultrapassam 10Mg/ha.ano, o que tende a implicar em mais sedimentos sendo aportados e transportados pelos cursos hídricos. Por outro lado, bases de dados mostram que já existe uma grande quantidade de reservatórios implantados no continente e que mais outros devem ser implantados nas próximas décadas (Yigzaw et al., 2018; Zarfl et al., 2015). Combinando esses dois elementos, mais sedimentos também tenderão a ser retidos em reservatórios e muitos desses poderão ter sua vida útil abreviada.

1) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre; h.o.fagundes@hotmail.com; 51 33086670

2) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre fernando.fan@ufrgs.br; 51 33086670

3) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre; ayan.fleischmann@gmail.com; 51 33086670

4) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre rodrigodpaiva@gmail.com; 51 33086670

5) Universidade Federal do Espírito Santo, Av. Fernando Ferrari, Goiabeiras, 514, Vitória; diogo.buarque@gmail.com; 27 33352853

6) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre; vinisiquera@gmail.com; 51 33086670

7) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre; waltercollischonn@gmail.com; 51 33086670

No âmbito da modelagem hidrológica-hidrodinâmica de reservatórios em escala continental/global se mencionam: (i) os recentes avanços realizados por Shin et al. (2019) no desenvolvimento de novas técnicas; e (ii) a melhoria da performance do modelo MGB AS (Siqueira et al., 2018) alcançada por Passaia et al. (2020) ao incluir vazões diárias de operação substituídas no modelo. Na modelagem de sedimentos, a representação dos reservatórios comumente são mais simplificadas e muitas vezes só permitem realizar estimativas de retenção de longo período (e.g. Cohen et al., 2014; Dunn et al., 2019; Forsberg et al., 2017). Essa distância entre as práticas mais avançadas da modelagem dos fluxos de água em comparação com as de sedimentos mostra que ainda existe uma lacuna a ser preenchida na prática de melhor representação da influência dos reservatórios nos fluxos de sedimentos em grandes escalas (global e continental). Visando ajudar a preencher esta lacuna o presente trabalho teve por objetivo avaliar a performance de um modelo de sedimentos continental em representar os fluxos de sedimentos em suspensão e de leito. Para isso foi considerada a presença de 234 grandes reservatórios na América do Sul.

ÁREA DE ESTUDO

A América do Sul (AS) transporta cerca de 20% dos sedimentos que chegam aos oceanos (Syvitski et al., 2005) e os rios Amazonas e Magdalena estão entre os que mais exportam sedimentos em todo o mundo (Mouyen et al., 2018). A AS possui a segunda maior taxa de erosão potencial do planeta e é a região que vem tendo o maior aumento dessa taxa no último século (Wuepper et al., 2019). Dentre as bacias que apresentam as maiores taxas de retenção de sedimentos se destacam a do rio São Francisco, Tocantins e Paraná (e.g. Syvitski et al. 2005). A área de estudo completa é apresentada na Figura 1.

MÉTODOS

A modelagem de sedimentos em escala continental com a presença de reservatórios foi realizada a partir do modelo MGB-SED AS (Fagundes et al., 2021). O modelo original apresentado pelos autores não considerava a presença de reservatórios e a performance do modelo foi avaliada apenas em termos de sedimentos em suspensão. Avançando em relação a proposta inicial, neste trabalho utilizou-se 234 grandes reservatórios (capacidade de armazenamento > 106m³) provenientes da base de dados de Yigzaw et al. (2018) e das bases de dados brasileiras da Agência Nacional de Águas (ANA) e do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Só foram considerados reservatórios: (i) em operação; (ii) que tivessem disponíveis as informações de cota (ANA/ONS)/altura(Yigzaw)-área-volume; e (iii) que, devido a escala e concepção do modelo, não estavam em bacias de cabeceira (~1.000km² de área de drenagem).

Para representar as defluências dos reservatórios, utilizou-se a regra de operação simplificada proposta por Shin et al. (2019). Para representar a deposição dos sedimentos finos (silte e argila) nos reservatórios, utilizou-se a equação proposta por Julien (2010) e para areias, considerou-se que tudo que chega nos reservatórios é depositado. Os reservatórios foram incluídos na simulação a partir do momento que iniciaram sua operação. A simulação foi realizada de 1980 a 2019, utilizando a base de

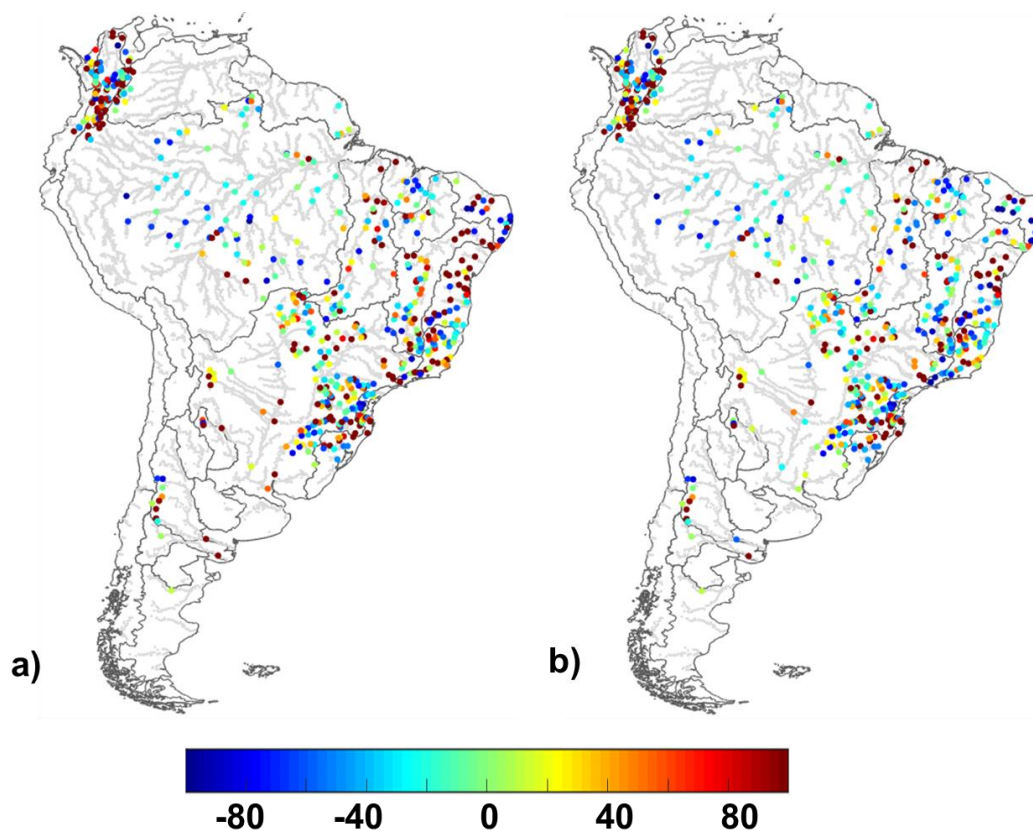
dados de chuva MSWEP (Beck et al., 2017) até 2014 e os dados do GPM(Skofronick-Jackson et al., 2017) a partir de 2015.

A performance do modelo foi avaliada de 3 formas distintas: i) comparação da descarga de sedimentos em suspensão (QSS) simulada com os valores diários de QSS observados em 595 estações na América do Sul (Fagundes et al., 2021), utilizando o erro relativo (BIAS); ii) comparação das vazões simuladas a jusante dos reservatórios com dados observados de postos da ANA, avaliando o quanto o coeficiente de Eficiência de Nash Sutcliffe (NSE) melhorou em relação a simulação sem reservatórios; iii) comparação das descargas sólidas de leito (QSL) simuladas com valores estimados por diversos trabalhos realizados na América do Sul. Os dados de descarga de leito foram obtidos a partir de uma busca exaustiva na literatura, realizada em português, inglês e espanhol.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 1 apresenta a comparação do viés (BIAS) dos resultados de simulações sem considerar a influências de reservatório (Figura 1a) e com a proposta de consideração dos reservatórios desenvolvida no presente trabalho (Figura 1b). Já a Figura 2 mostra um exemplo de sedimentograma da simulação da concentração de sedimentos com o modelo da América do Sul para a localidade de Propriá no Rio São Francisco. A linha vermelha mostra o modelo sem considerar os reservatórios e a linha azul o modelo desenvolvido no presente trabalho com a presença de reservatórios. Os pontos pretos são dados observados.

Figura 1. Viés (BIAS) da descarga de sedimentos em suspensão simulada na América do Sul. Em a) temos o modelo sem considerar os reservatórios e em b) o modelo desenvolvido no presente trabalho com a presença de reservatórios.

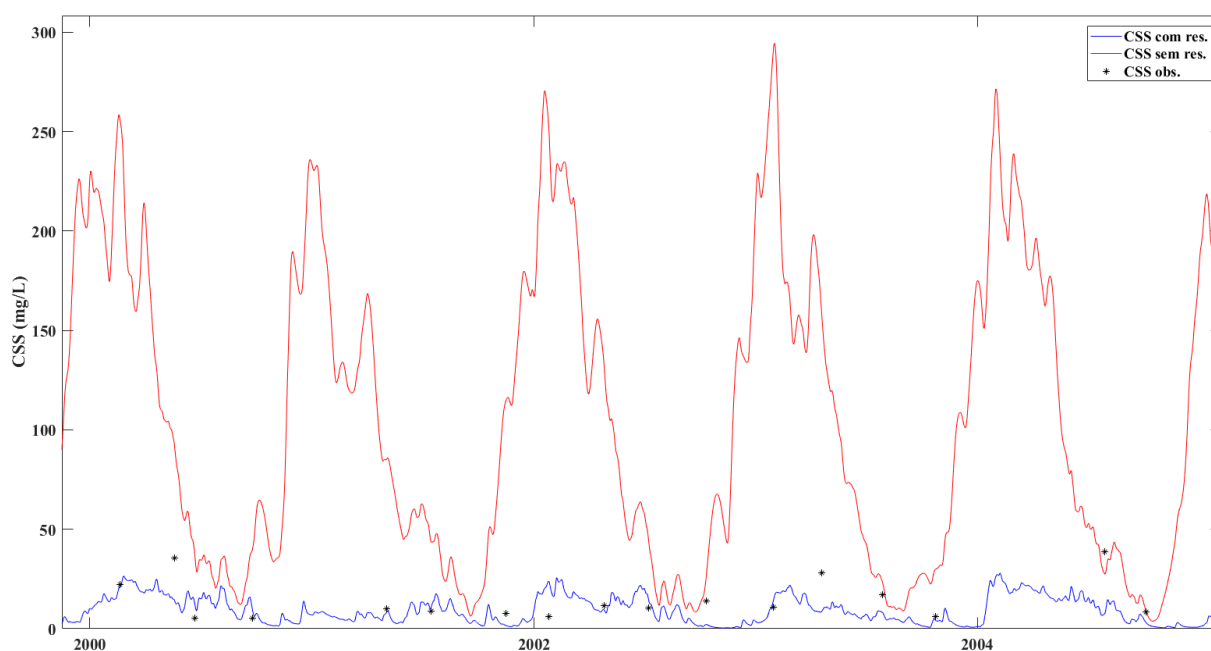


Em ambas as figuras é possível observar que a implementação dos reservatórios diminui os erros da modelagem em comparação com os dados observados. Na Figura 1, que mostra um panorama geral da métrica para todo o continente, é possível ver que em locais como na bacia do Rio Paraná, do Rio Uruguai e do Rio São Francisco, onde existem muitos reservatórios nos rios principais, o viés no modelo com reservatórios é menos expressivo (os pontos se concentram mais na faixa entre azul claro, verde e laranja). Ou seja, o modelo com reservatórios representa os dados observados de concentração de sedimentos com menos viés do que o modelo sem reservatórios.

Na Figura 2 é possível um exemplo de sedimentograma para a localidade de Propriá no Rio São Francisco. A linha vermelha mostra o modelo sem considerar os reservatórios e a linha azul o modelo desenvolvido no presente trabalho com a presença de reservatórios. Os pontos pretos são dados observados. Destaca-se na figura como a simulação sem a presença de reservatórios tende a superestimar as concentrações de sedimentos em relação às observações. Já a simulação com a presença de reservatórios representa de forma mais próxima os dados observados.

Figura 2. Exemplo de sedimentograma da simulação da concentração de sedimentos com o modelo da América do Sul para a localidade de Propriá ($A_{\text{drenagem}}=634.338\text{km}^2$) no Rio São Francisco. A linha vermelha mostra o modelo sem considerar os reservatórios e a linha azul o modelo desenvolvido no presente trabalho com a presença de reservatórios.

Os pontos pretos são dados observados.



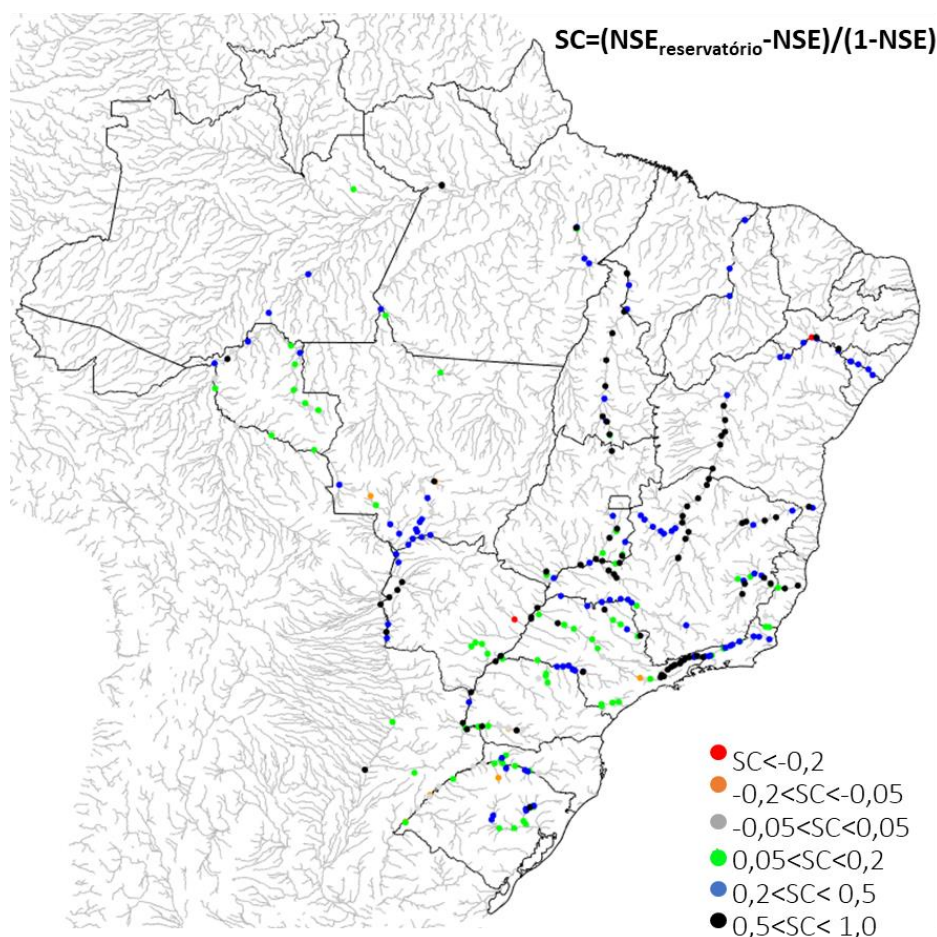
Na Figura 3, a seguir, é apresentada uma análise de como o resultado do modelo com reservatórios se comparada ao resultado do modelo sem reservatórios em termos de coeficiente de Eficiência de Nash Sutcliffe (NSE) para as vazões. Na métrica de “*skill*” apresentada na figura os pontos azuis e pretos representam que o valor de NSE do modelo com reservatório (NSE_{reserv}) é melhor que o modelo sem reservatórios. Já os pontos laranjas e vermelhos representam que o modelo

com reservatórios é pior. Pontos cinzas e verdes mostram locais que não sofreram alterações grandes ou que não são influenciados por reservatórios.

A análise da Figura 3 permite ver que para a grande maioria dos pontos o modelo com reservatórios, desenvolvido para o presente trabalho, possui melhor desempenho que o modelo sem reservatórios. Destacam-se no mapa da Figura 3 os rios São Francisco, Paranapanema, Madeira, Tocantins e Paraguai. Também o eixo principal do Rio Paraná e toda a região de montante do rio Uruguai. Esta constatação também reforça a vasta influência dos reservatórios sobre a dinâmica de sedimentos da América do Sul, uma vez que os pontos espalhados em todo o mapa são influenciados pela alteração de inclusão de reservatórios na modelagem de sedimentos.

Figura 3. Resultado do modelo com reservatórios e sem reservatórios em termos de coeficiente de Eficiência de Nash

Sutcliffe (NSE) para as vazões. Na métrica SC de “skill” apresentada na figura os pontos verdes, azuis e pretos representam que o valor de NSE do modelo com reservatório é melhor que o modelo sem reservatórios. Já os pontos laranjas e vermelhos representam que o modelo com reservatórios é pior. Pontos cinzas mostram locais que não sofreram alterações grandes ou que não são influenciados por reservatórios.

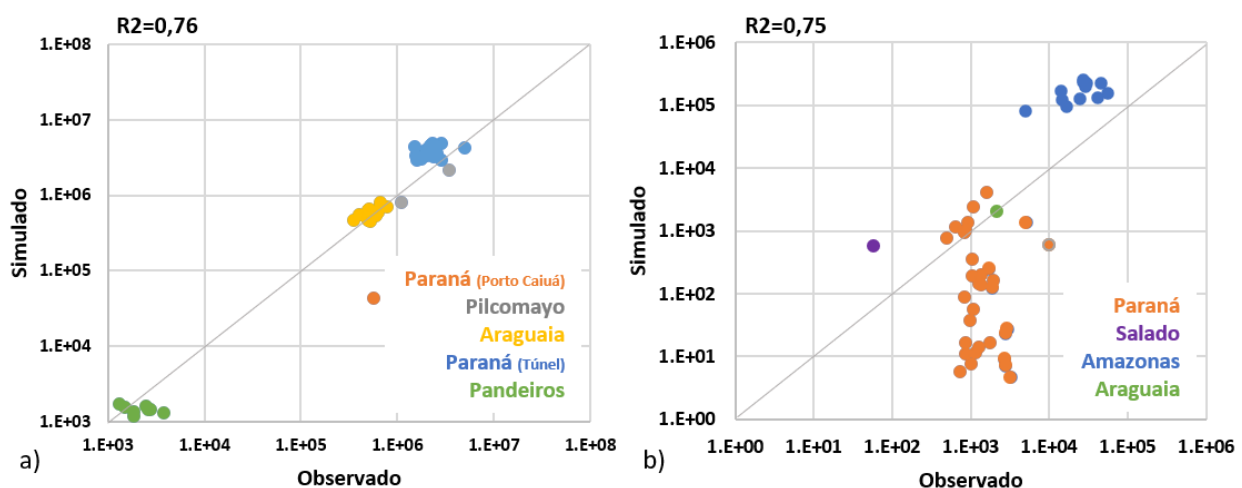


Quando se trata do assunto de reservatórios, além das descargas em suspensão existe uma preocupação relevante com o caso dos sedimentos de descarga do leito. A Figura 4 apresenta uma comparação das descargas sólidas de leito (QSL) simuladas com valores estimados por diversos trabalhos realizados na América do Sul. Os dados de descarga de leito foram obtidos a partir de uma

busca exaustiva na literatura, realizada em português, inglês e espanhol. Esta validação é apresentada apenas para o caso do modelo já com reservatórios e, como os dados observados são relativamente poucos em comparação com os dados de sedimentos em suspensão, estes foram agrupados em um só conjunto para análise.

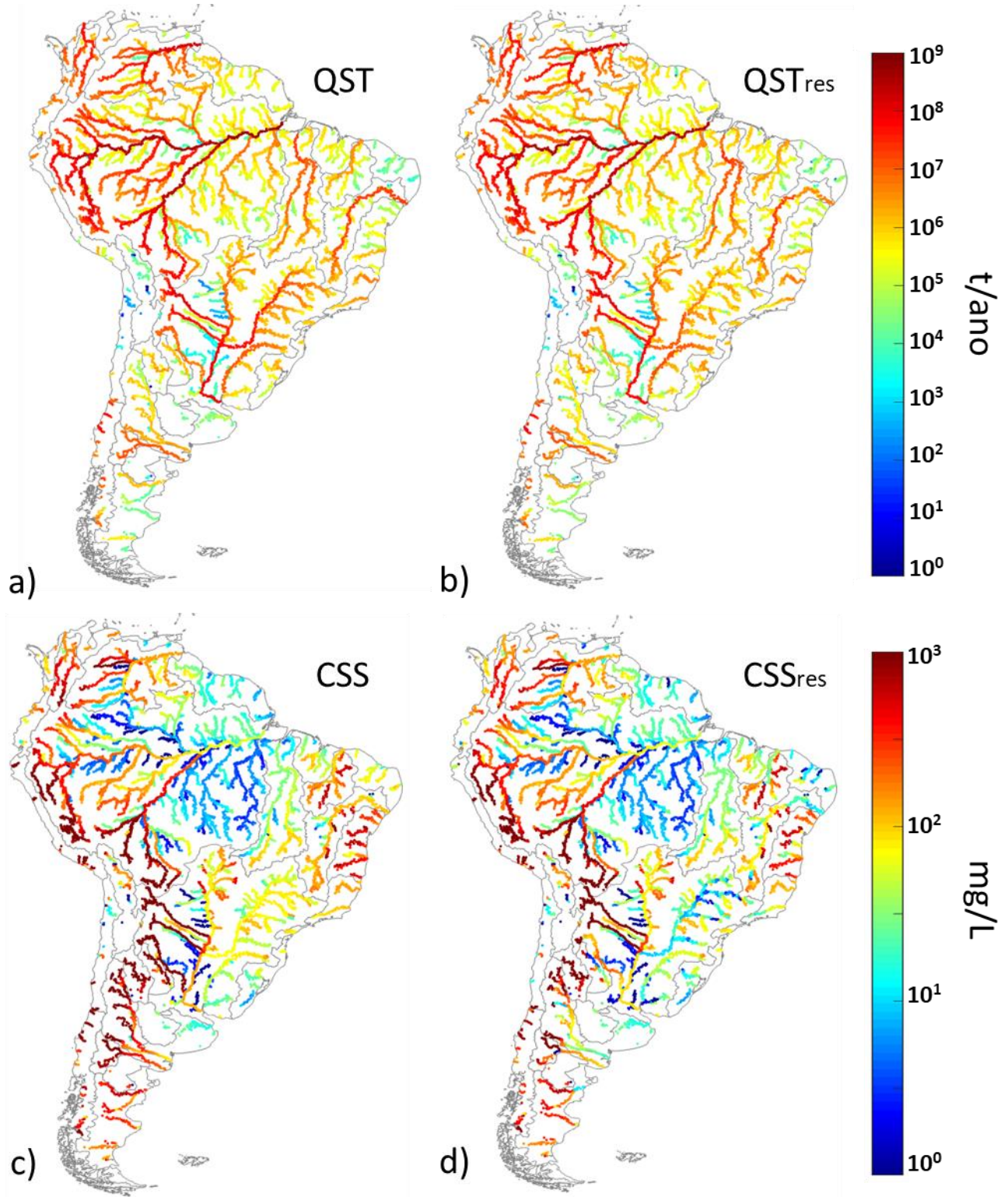
Pode-se ver na Figura 4 que existe um coeficiente de determinação maior do que 0,7 para as descargas sólidas do leito simuladas e observadas para a América do Sul. Apesar de os pontos terem alguma dispersão, os resultados indicam que as ordens de grandeza são representadas de forma coerente com a realidade observada para os grandes rios onde foram encontradas informações.

Figura 4. Comparação das descargas sólidas de leito (QSL) simuladas com valores estimados por diversos trabalhos realizados na América do Sul (Vollmers et al., 1983; ICLA, 1982; Gamaro et al., 2011; Gamaro et al., 2014; Alarcón et al., 2003; Latrubesse et al., 2009; CNEN/CDTN e IFNMG/Campus Januária, 2020; Strasser, 2008; Martins e Stevaux, 2008; Szupiany et al., 2005; Carvalho et al., 2009; Martins et al., 2009): a) QSL anual (t/ano) e b) QSL diária (t/dia). Os dados de descarga de leito foram obtidos a partir de uma busca exaustiva na literatura, realizada em português, inglês e espanhol.



A partir do modelo desenvolvido e validado no presente trabalho a Figura 5 apresenta uma primeira estimativa da descarga total de sedimentos (QST) em toneladas por ano para todos os trechos de rio da América do Sul simulados sem e com a presença de reservatórios. Destacam-se como grandes exportadores de sedimentos, mesmo com a presença de reservatórios, todos os rios que drenam a região Andina do continente. Além disso as bacias do Rio da Prata, Tocantins-Araguaia e São Francisco dentro do território brasileiro. Também se observa de forma mais marcante a diferença nas concentrações de sedimentos em suspensão (CSS) sem e com reservatórios, especialmente nas bacias do rio Paraná, alto Uruguai e do rio São Francisco. Os valores apresentados na Figura 5 são baseados na modelagem apresentada e possuem as incertezas e os erros destacados nos procedimentos de validação mostrado. Porém acredita-se que servem de referência baseada em modelagem e uso de dados observados para estimativas continentais de grande escala que dificilmente são passíveis de serem obtidas por outros meios.

Figura 5. Primeira estimativa da descarga total de sedimentos (QST) para todos os grandes rios da América do Sul simulados sem (a) e com (b) a presença de reservatórios. Comparação da concentração de sedimentos em suspensão (CSS) sem (c) e com (d) a presença de reservatórios.



Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um modelo de sedimentos para a América do Sul que inclui o efeito de reservatórios na propagação dos sedimentos. O modelo foi baseado em uma versão prévia do modelo que não considerava a presença dos reservatórios. Através dos resultados analisados é possível concluir que:

- i) O modelo com reservatórios apresenta valores simulados de descarga sólida e concentração de sedimentos em suspensão com menor viés do que o modelo sem considerar reservatórios.
- ii) A inclusão dos reservatórios no modelo resulta em melhor desempenho das vazões simuladas em termos de Eficiência de Nash Sutcliffe para grande parte do território da América do Sul.
- iii) O modelo com reservatórios representa as descargas do leito estimadas por outros estudos da literatura com valor de coeficiente de determinação superior a 0,7. Isso sugere coerência com a realidade observada, apesar dos poucos dados disponíveis para validação.

Além disso, o trabalho apresentou um primeiro mapa com estimativa da descarga sólida total (t/ano) em vários trechos de rios distribuídos pela América do Sul, considerando o efeito dos reservatórios. Apesar das incertezas e erros observados na modelagem, os resultados apresentados servem de referência para estudos comparativos, além de permitir identificar as ordens de grandeza de variáveis hidrossedimentológicas.

AGRADECIMENTOS

O primeiro e o Segundo autor agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelas bolsas de pesquisa números 167867/2018-0 e 305636/2019-7.

REFERÊNCIAS

- Alarcón, J. J.; Szupiany, R.; Montagnini, M. D.; et al., 2003. *Evaluación del transporte de sedimentos en el tramo medio del río Paraná*. In: Primer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Argentina: Ezeiza,
- Barbarossa, V.; Schmitt, R.J.P.; Huijbregts, M.A.J.; et al., 2020. *Impacts of current and future large dams on the geographic range connectivity of freshwater fish worldwide*. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 117, 3648–3655. <https://doi.org/10.1073/pnas.1912776117>
- Beck, Hylke E.; Van Dijk, A.I.J.M.; Levizzani, V.; et al., 2017. *MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979-2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data*. Hydrol. Earth Syst. Sci. 21, 589–615. <https://doi.org/10.5194/hess-21-589-2017>
- Best, J., 2019. *Anthropogenic stresses on the world's big rivers*. Nat. Geosci. 12, 7–21. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0262-x>
- Borrelli, P.; Robinson, D.A.; Fleischer, L.R.; et al., 2017. *An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion*. Nat. Commun. 8, 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>

Carvalho, T. M., 2009. *Avaliação do transporte de carga sedimentar no médio rio Araguaia*. Geosul, 24(47), 147-160.

CNEN/CDTN, IFNMG/Campus Januária. Projeto FAPEMIG APQ-03773-14: “SUSTENTABILIDADE DA BACIA DO RIO PANDEIROS-MG: Dinâmica de Vertentes da Bacia do Rio Pandeiros”. Edital de Referência: 13/2014. Subprojeto 2: Caracterização Qualitativa e Quantitativa de Parâmetros Hídricos e Sedimentológicos da Rede de Drenagem do Rio Pandeiros. Belo Horizonte, 2020.

Cohen, S.; Kettner, A.J.; Syvitski, J.P.M.; 2014. *Global suspended sediment and water discharge dynamics between 1960 and 2010: Continental trends and intra-basin sensitivity*. Glob. Planet. Change 115, 44–58. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.01.011>

Dunn, F.E.; Darby, S.E.; Nicholls, R.J.; et al., 2019. *Projections of declining fluvial sediment delivery to major deltas worldwide in response to climate change and anthropogenic stress*. Environ. Res. Lett. 14, 084034. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab304e>

Fagundes, H. O.; Fan, F. M.; Paiva, R. C. D.; et al., 2021. *Sediment flows in South America supported by daily hydrologic-hydrodynamic modeling*. Water Resources Research, 57, e2020WR027884. <https://doi.org/10.1029/2020WR027884>

Forsberg, B.R.; Melack, J.M.; Dunne, T.; et al., 2017. *The potential impact of new Andean dams on Amazon fluvial ecosystems*, PLoS ONE. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182254>

Gamaro, P. E. M.; Maldonado, L. H.; Castro, J. L., 2014. *Aplicação do método das dunas para determinação da descarga de fundo no rio Paraná*. Anais. In: XI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos.

Gamaro, P. E. M.; Maldonado, L. H.; Lima, K. A., 2011. *Avaliação da carga de sedimentos de fundo pelo método de deslocamento de dunas e medidores acústicos doppler*. Anais. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

Grill, G; Lehner, B.; Thieme, M.; et al., 2019. *Mapping the world's free-flowing rivers*. Nature. 569, 215–221. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1111-9>

ICLA. Projeto Hidrelétrico ICLA. *Hidrologia e Sedimentologia*. Informe final. 149 p. 1982.

Julien, P. Y. *Erosion and Sedimentation*. 2º ed. Cambridge University press. 2010.

Latrubesse, E. M.; Amsler, M. L.; de Moraes, R. P.; Aquino, S. *The geomorphologic response of a large pristine alluvial river to tremendous deforestation in the South American tropics: The case of the Araguaia River*. Geomorphology, 113(3-4), 239-252, 2009.

Latrubesse, E.M.; Stevaux, J.C.; Sinha, R., 2005. *Tropical rivers*. Geomorphology 70, 187–206. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.02.005>

Martins, D. P.; Bravard, J. P.; Stevaux, J. C., 2009. Dynamics of water flow and sediments in the upper Paraná River between Porto Primavera and Itaipu Dams, Brazil. Latin American journal of sedimentology and basin analysis, 16(2), 111-118.

Martins, D. P.; Stevaux J. C. *Formas de leito e transporte de carga de fundo do alto rio Paraná*. Revista Brasileira de Geomorfologia, 6(2).

Mouyen, M.; Longuevergne, L.; Steer, P.; et al., 2018. *Assessing modern river sediment discharge to the ocean using satellite gravimetry*. Nat. Commun. 9, 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05921-y>

Passaia, O.; Siqueira, V.A.; Brêda, J.P.; et al., 2020. *Impact of large reservoirs on simulated discharges of Brazilian rivers*. Brazilian J. Water Resour. 25, 1–9.

Shin, S.; Pokhrel, Y.; Miguez-Macho, G., 2019. *High-resolution modeling of reservoir release and storage dynamics at the continental scale*. Water Resources Res. 55, 787–810.

Siqueira, V.A.; Paiva, R.C.D.; Fleischmann, A.S.; et al., 2018. *Toward continental hydrologic – hydrodynamic modeling in South America*. Hydrol. Earth Syst. Sci. 22, 4815–4842. <https://doi.org/doi.org/10.5194/hess-22-4815-2018>

Skofronick-Jackson, G.; Petersen, W. A.; Berg W., et al., 2017. *The global precipitation measurement (GPM) mission for science and Society*. Bull Am Meteorol Soc 98:1679–1695. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00306.1>

STRASSER M. A. *Dunas fluviais no rio Solimões-Amazonas: dinâmica e transporte de sedimentos*. COPPE/UFRJ (Tese de doutorado), 2008.

Syvitski, J.P.M.; Vörösmarty, C.J.; Kettner, A.J.; Green, P., 2005. *Impact of Humans on the Flux of Terrestrial Sediment to the Global Coastal Ocean*. Science (80-.). 308, 376–380.

Szupiany, R.; Trento, A.; Alvarez, A. M., 2005. *Transporte de sedimentos de fondo en el rio Salado (Santa Fe, Argentina)*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 10(1), 79-88.

Vollmers, H. J.; Palenque, E. G. *Sediment measurements in the Pilcomayo River in Bolivia*. In: *Symposium on river sedimentation (China)*. 1983. Disponível na biblioteca da IHH em La Paz, Bolivia.

Wuepper, D., Borrelli, P., Finger, R., 2019. *Countries and the global rate of soil erosion*. Nat. Sustain. 1–5. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0438-4>

Yigzaw, W.; Li, H.-Y.; Demissie, Y.; et al., 2018. *A New Global Storage-Area-Depth Dataset for Modeling Reservoirs in Land Surface and Earth System Models*. Water Resour. Res. Tech. 54, 10,372–10,386.

Zarfl, C.; Lumsdon, A.E.; Berlekamp, J.; et al., 2015. *A global boom in hydropower dam construction*. Aquat. Sci. 77, 161–170. <https://doi.org/10.1007/s00027-014-0377-0>