

XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

TRANSPORTE E DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS EM UMA BACIA COM RESERVATÓRIOS EM CASCATA

*Hugo de Oliveira Fagundes¹; Alice César Fassoni-Andrade²; Ayan Santos Fleischmann³,
Fernando Mainardi Fan⁴ & Walter Collischonn⁵*

Abstract: Reservoir cascades are built on many rivers around the world in order to use water resources for power generation and human supply. In this work, the impact of a reservoir cascade on sediment transport and deposition in time and space was studied. The study area chosen was the Paranapanema River basin, which has 10 reservoirs in the main river. The study was conducted from data simulated with the MGB-SED AS model in the time between 1980 and 2019. Results showed that the construction of new reservoirs decreased the sediment delivery to downstream reservoirs and that rainfall is the main responsible for shaping the pattern of sediment transport and deposition plots. A special analysis showed that the Capivara reservoir was strongly affected by the reservoirs built upstream, especially the Governador Jayme Canet Jr. reservoir. Between 2012 and 2019 the Governador Jayme Canet Jr. reservoir retained about 3,759 kt/yr that could have been carried downstream and deposited mostly in the Capivara reservoir. This reduction in the amount of sediments deposited in the Capivara reservoir has increased its lifespan, which is the largest reservoir in the basin in terms of volume.

Resumo: Cascatas de reservatórios são construídas em diversos rios do mundo a fim de aproveitar os recursos hídricos para geração de energia e abastecimento humano. Neste trabalho, foi estudado qual o impacto de uma cascata de reservatórios no transporte e deposição de sedimentos no tempo e no espaço. A área de estudo escolhida foi a bacia hidrográfica do rio Paranapanema, que conta com 10 reservatórios no rio principal. O estudo foi realizado a partir de dados simulados com o modelo MGB-SED AS no período entre 1980 e 2019. Os resultados mostraram que a construção de novos reservatórios diminuíram o aporte de sedimentos para os reservatórios de jusante e que a chuva é a principal responsável por modelar o padrão dos gráficos de transporte e deposição de sedimentos. Uma análise especial mostrou que o reservatório Capivara foi fortemente afetado pelos reservatórios construídos a montante, em especial o reservatório Governador Jayme Canet Jr. Entre 2012 e 2019 o reservatório Governador Jayme Canet Jr. reteve cerca de 3.759 kt/ano que poderiam ter sido propagadas para jusante e depositadas, em sua grande maioria, no reservatório Capivara. Essa redução na quantidade de sedimentos depositados no reservatório Capivara tem feito com que a vida útil deste, que é o maior reservatório da bacia em termos de volume, aumente.

Palavras-Chave – rio Paranapanema, MGB-SED, modelagem.

1) Universidade Estadual de Campinas, Cidade Universitária Zeferino Vaz - Barão Geraldo, Campinas – SP, h.o.fagundes@hotmail.com

2) Instituto de Geociências, Universidade de Brasília (UnB), Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília, alice.fassoni@unb.br

3) Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá, Tefé, Amazonas, Brasil, ayan.fleischmann@mamiraua.org.br

4) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves - Agronomia, Porto Alegre – RS, fernando.fan@ufrgs.br

5) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves - Agronomia, Porto Alegre – RS, collischonn@iph.ufrgs.br

INTRODUÇÃO

Reservatórios que regularizam a vazão são estruturas importantes tanto para períodos de seca, garantindo maior disponibilidade hídrica em função da água reservada, como em períodos de cheias, sendo capazes de amortecer os impactos da onda de cheia para jusante.

No Brasil, em especial, os reservatórios são componentes importantes do nosso sistema integrado nacional de geração elétrica, responsáveis por uma parcela relevante da geração elétrica total brasileira. O SIN (Sistema Integrado Nacional) é um dos maiores sistemas integrados de geração de energia elétrica do mundo.

Ao mesmo tempo os reservatórios funcionam como zonas de deposição de sedimentos que são transportados pela via fluvial. O estudo da vida útil de reservatórios é uma das análises geralmente obrigatórias nos estudos de viabilidade e de impactos ambientais durante as fases de projeto e licenciamento de tais estruturas, pois a deposição dos sedimentos nos reservatórios compromete a sua vida útil para estes principais usos assim como para outros para os quais geralmente os barramentos são projetados.

Compreendida a importância dos reservatórios e dos estudos de sedimentação, é relevante notar também que quando um reservatório é construído a montante/jusante de outro, formando o que normalmente se denomina por “cascata” de reservatórios, é de se esperar que menos sedimentos cheguem nos reservatórios de jusante, já que estes ficam depositados nos reservatórios de montante (Morris and Fan, 1998). Tem-se, assim, um possível aumento da vida útil dos reservatórios da cascata que estão localizados a jusante. É importante destacar que a introdução de reservatórios num curso d'água também pode provocar erosões no canal a jusante, a depender das condições hidráulicas e geomorfológicas do rio, dado o desequilíbrio sedimentológico provocado pelos barramentos no escoamento superficial (Lane, 1995).

Para entender esta influência deve-se lançar mão de dados observados e de técnicas que permitam explorar ao máximo estes dados, como o uso de modelos. No que tange a disponibilidade de dados de sedimentos, que tendem a ser dados hidrológicos mais escassos e mais incertos do que outros dados como de chuva e vazão, os usos de estratégias baseadas em modelagem se mostram relevantes na realização de estudos para o passado, bem como para a definição de diretrizes para o futuro. Estudos de modelagem de sedimentos em escala regional, continental e global têm sido publicados mostrando a relevância deste tipo de abordagem para a compressão de processos de sedimentos em grande escala, incluindo a influência humana (Syvitski et al. 2005; Cohen et al. 2014; Waters and Lewis, 2017; Huang et al., 2020; Wei et al., 2019; Fagundes et al., 2023; Garner et al., 2023).

Nesta linha, o objetivo do presente estudo é investigar como a presença de uma cascata de reservatórios pode influenciar no transporte e deposição de sedimentos, no tempo e no espaço. O estudo é baseado na aplicação de uma abordagem de simulação hidrossedimentológica de grande escala.

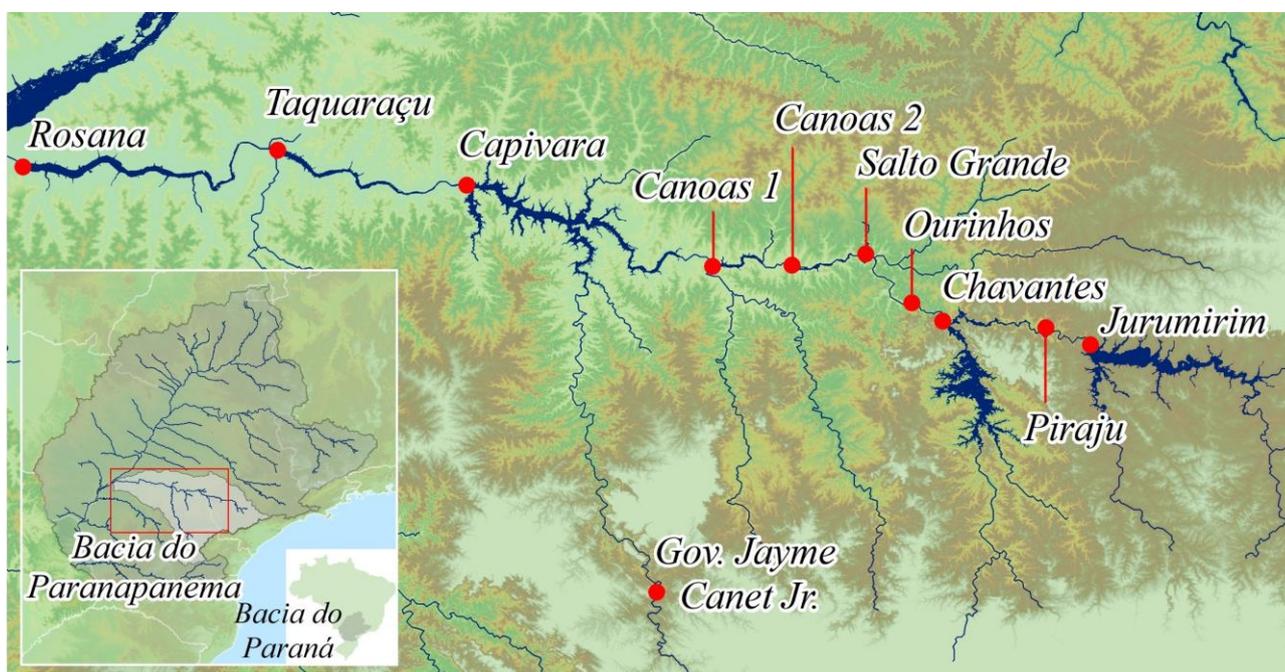
Como estudo de caso foi definida uma bacia hidrográfica com uma cascata de reservatórios com dados conhecidos do SIN. Este estudo pode ser entendido como um experimento inicial que pode ser expandido para outras cascatas de reservatórios, principalmente da América do Sul.

ÁREA DE ESTUDO

O rio Paranapanema é um afluente direto do rio Paraná, pela sua margem esquerda, e localiza-se na divisa entre os estados do Paraná e São Paulo. O rio Paranapanema nasce na Serra de Agudos Grandes, no sudeste do Estado de São Paulo, a cerca de 100 km da costa atlântica e a aproximadamente 900 m de altitude, percorre cerca de 900 km no sentido oeste, até sua foz no rio Paraná. A bacia hidrográfica do rio Paranapanema tem uma área de cerca de 106 mil km².

O escoamento da água ao longo do rio principal é fortemente controlado pelas regras operacionais de geração definidas pelo sistema elétrico brasileiro. A cascata de reservatórios no rio principal da bacia conta com dez reservatórios desde Jurumirim até Rosana (figura 1). Além desses, têm-se ainda o reservatório Governador Jayme Canet Jr., localizado no rio Tibajá, afluente do rio Paranapanema.

Figura 1 – Principais reservatórios da bacia hidrográfica do rio Paranapanema.



METODOLOGIA

Neste trabalho foi avaliada uma cascata de 11 reservatórios localizados na bacia do rio Paranapanema (figura 1), com volumes que variam de ~20hm³ a ~10.500 hm³ (Tabela 1). As informações de cota e relação altura-área-volume e ano de início da operação foram obtidas das bases de dados de Yigzaw et al. (2018), Agência Nacional de Águas (ANA) e do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

Os valores da descarga de sedimentos total (QST) nos rios, bem como os valores de deposição de sedimentos (Dep) nos reservatórios foram simulados para o período entre 1980 e 2019 por Fagundes et al. (2023) utilizando o modelo de transporte de sedimentos continental MGB-SED AS (Fagundes et al., 2021). Para representar as defluências dos reservatórios, Fagundes et al. (2023) utilizaram a regra de operação simplificada proposta por Shin et al. (2019). Para representar a deposição dos sedimentos finos (silte e argila) nos reservatórios, os autores utilizaram a equação proposta por Julien (2010) e, para areias, consideraram que tudo que chega nos reservatórios é depositado. Os reservatórios foram incluídos na simulação a partir da data em que iniciaram sua operação. O modelo MGB-SED AS foi forçado com dados de chuva dos produtos MSWEP (Beck et al., 2017) até 2014 e os dados do GPM (Skofronick-Jackson et al., 2017) a partir de 2015.

Tabela 1 – Característica dos reservatórios utilizados

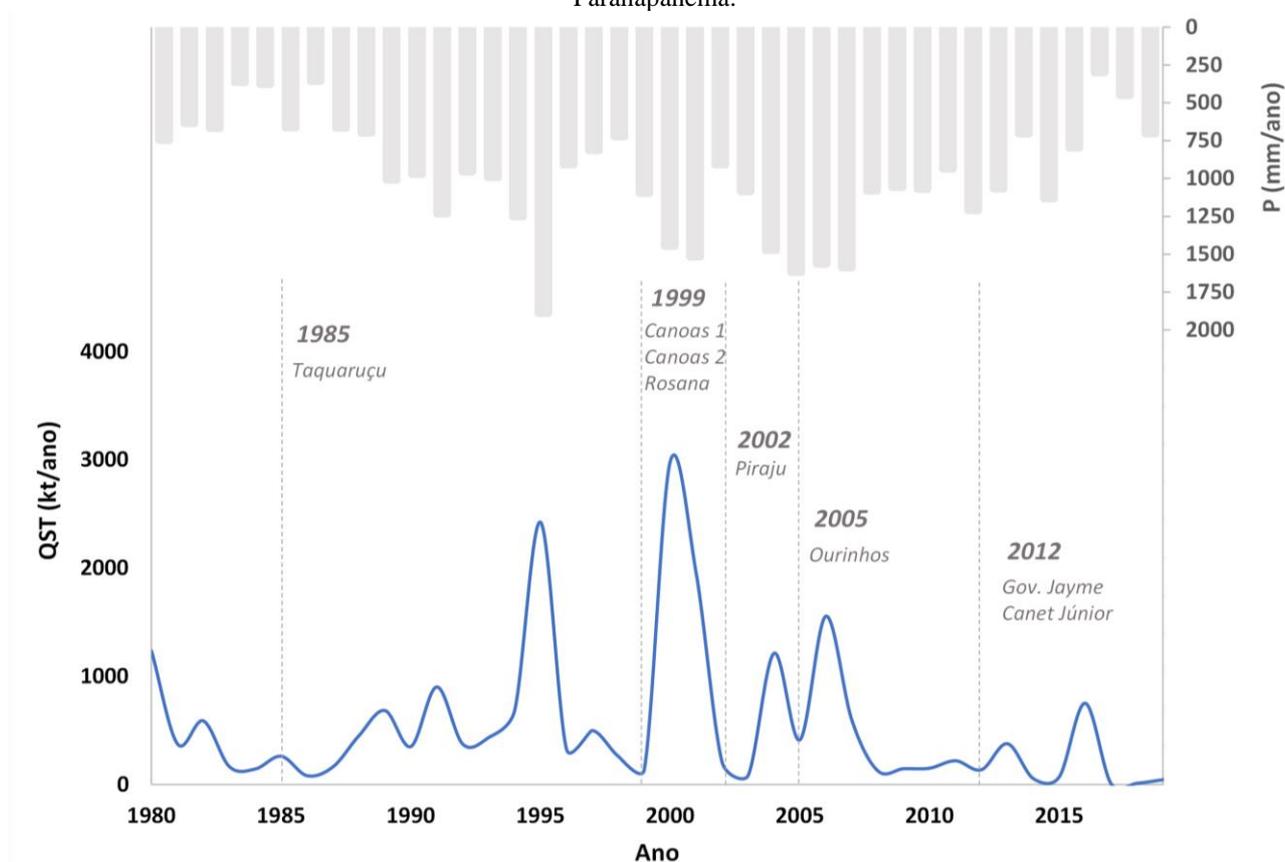
	ANO	A _{MAX} (km ²)	V _{MAX} (hm ³)	V _{MAX} / V _{TOT} ¹	TIPO DA USINA
SALTO GRANDE	1958	4	48	0%	Fio d'água
JURUMIRIM	1962	376	6957	22%	Regularizada
CHAVANTES	1971	358	8818	28%	Regularizada
CAPIVARA	1976	416	10547	33%	Regularizada
TAQUARUÇU	1985	81	643	2%	Fio d'água
CANOAS 2	1999	20	146	0%	Fio d'água
CANOAS 1	1999	24	218	1%	Fio d'água
ROSANA	1999	200	1890	6%	Fio d'água
PIRAJU	2002	17	109	0%	Fio d'água
OURINHOS	2005	5	23	0%	Fio d'água
GOV. JAYME CANET JR.	2012	86	2266	7%	Regularizada

¹ V_{tot} – Volume total armazenado pelos 11 reservatórios apresentados na tabela.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 2 mostra valores anuais de chuva na bacia que estão bem correlacionados com a QST ao longo do tempo. Assim, os reservatórios construídos a partir de 1980 no rio Paranapanema não parecem causar uma redução na descarga de sedimentos total (QST) que sai da bacia, estando essa muito mais associada ao regime de chuvas da bacia. Por ser uma grande bacia, em determinados períodos, afluentes que transportam mais sedimentos e apresentam menor conectividade com o rio principal podem influenciar esses valores de uma maneira mais específica, mas esse detalhamento e análise não é o objeto deste estudo.

Figura 2 – Descarga de sedimentos total anual (QST) ao longo do tempo no exutório da bacia hidrográfica do rio Paranapanema.



Entretanto, em uma avaliação mais detalhada da dinâmica do transporte de sedimentos e a deposição nos reservatórios, pode-se perceber que os reservatórios apresentam sim grande influência na QST da bacia do rio Paranapanema. A figura 3 apresenta a deposição relativa de sedimentos ao longo do tempo, ou seja, DEP/DEP_{TOT} , em que DEP é o valor depositado no reservatório desde o início de sua operação e DEP_{TOT} é o valor total depositado nos reservatórios em operação no período analisado. Analisando o período entre 2012 e 2019, observa-se que os reservatórios que apresentam maior deposição relativa são o Governador Jayme Canet Jr. (41%), Capivara (29%), Chavantes (9%), Canoas 1 (7%) e Jurumirim (5%). Todos esses reservatórios, exceto o Canoas 1, são os reservatórios com capacidade regularização na bacia do rio Paranapanema, enquanto os demais são reservatórios a fio d'água. Reservatórios com capacidade de regularização terão maior tempo de detenção, o que fará com que os sedimentos tenham mais condições de se depositar. Nota-se que, para a maioria dos reservatórios a jusante de Jurumirim, que é o primeiro da cascata (figura 1), houve uma tendência de redução da capacidade relativa de retenção de sedimentos dos reservatórios nos três períodos analisados. Destaca-se que os períodos escolhidos marcam os principais reservatórios construídos na bacia (figura 2).

Para deixar ainda mais claro, tendo o reservatório Capivara como estudo de caso, nota-se que este reservatório era o que mais retinha sedimentos entre 1985-1998: 66% de todo o sedimento depositado nos reservatórios da bacia. Esse valor reduziu para 55% após a construção dos reservatórios Canoas 1 e 2, Piraju e Ourinhos, localizados a montante deste. Após a construção do reservatório Governador Jayme Canet Jr., em 2012, o valor reduziu ainda mais, para 29%, passando agora à segunda posição, atrás deste último, que agora representa uma capacidade de retenção relativa de 41%. Ao longo de todo o período simulado, a eficiência de retenção média do reservatório Capivara foi de 94%, com valores variando entre 79% e 99%. Isso mostra que essa diminuição no valor de DEP/DEP_{TOT} está relacionada com uma diminuição do aporte de sedimentos ao reservatório devido aos novos reservatórios construídos a montante. **Além disso, a redução do valor da deposição relativa de 55% para 29% (quase metade) mostra que, descontando os anos passados, possivelmente a vida útil do reservatório Capivara quase dobrou a partir da construção do reservatório Governador Jayme Canet Jr.**

Figura 3 – Percentual de sedimentos depositado em um reservatório quando comparado com o total depositado em todos os outros. Os reservatórios que não apresentam dados em um determinado período não tinham sido ainda construídos.



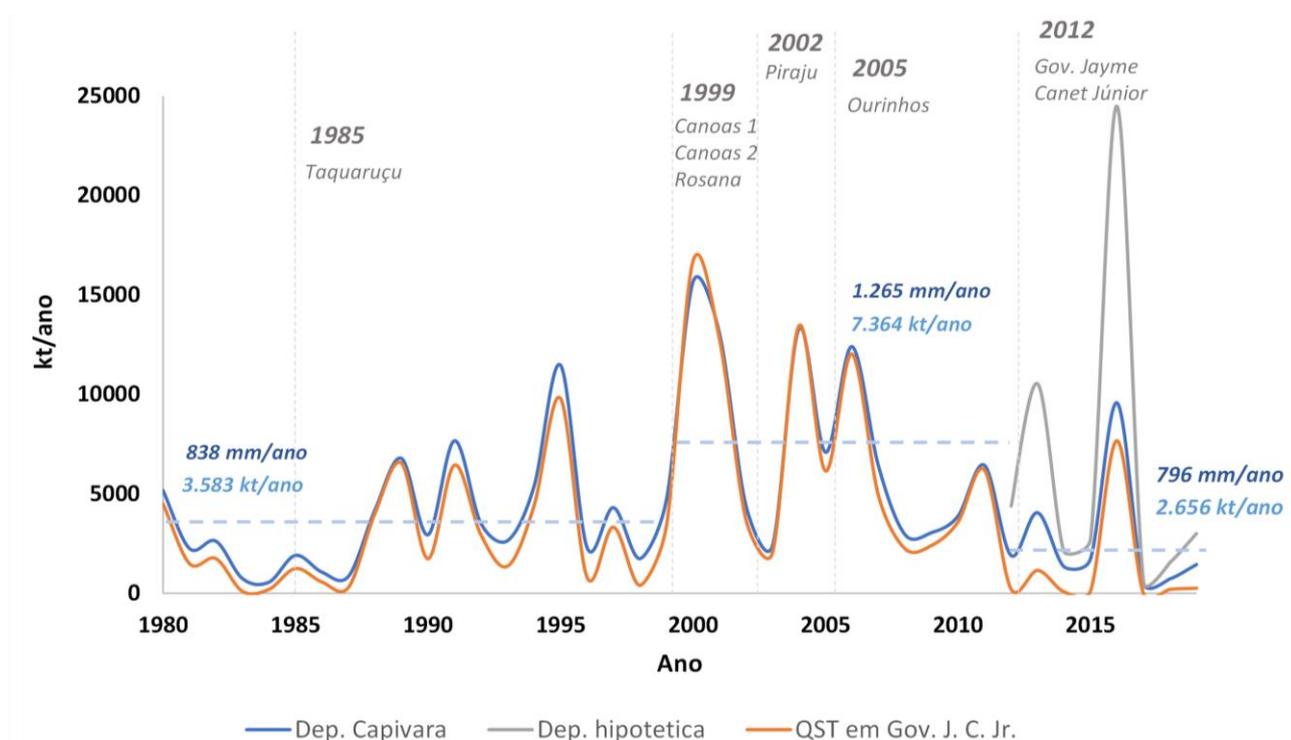
O reservatório Governador Jayme Canet Jr., localizado no rio Tibaji, interrompeu a conectividade dos sedimentos do principal contribuinte de sedimentos para o reservatório Capivara no período estudado. A figura 4 mostra, por exemplo, que a quantidade de sedimentos depositada no

reservatório Capivara é quase a mesma da QST que passa no local do reservatório Governador Jayme Canet Jr.

Um teste hipotético foi feito para comparar a carga simulada que depositou e a que depositaria no reservatório Capivara. Assim, a carga que seria depositada no reservatório Capivara caso o Governador Jayme Canet Jr. não tivesse sido construído (Deposição hipotética, figura 4) foi estimada somando a carga depositada no primeiro, com a carga que sai e que ficou depositada neste último. Neste teste, considerou a eficiência de retenção de cada ano para computar a carga que efetivamente seria depositada vindo do rio Tibaji. Este teste mostra que em 2016 ocorreria a maior deposição simulada no período entre 1980 e 2019, caso o rio Tibaji não tivesse sofrido um barramento (figura 4). Também se observa que o ano de 2017 foi tão seco neste rio que a contribuição deste para o reservatório Capivara foi quase nula.

Como é sabido, quanto maior a carga depositada em um reservatório, menor é a carga que vai para jusante. Assim, apesar de a figura 2 não mostrar claramente o efeito da diminuição da QST, a figura 4 evidencia claramente esse fenômeno. A figura 4 ainda mostra que no período entre 1999 e 2011 a deposição média no reservatório Capivara foi de 7.364 kt/ano; toda essa carga poderia compor a descarga sólida que saiu no exutório da bacia do rio Paranapanema para o rio Paraná.

Figura 4 – Deposição média anual de sedimentos ao longo do tempo no reservatório Capivara. A deposição hipotética (em cinza) indica o cenário de simulação sem a existência do reservatório de Governador Jayme Canet Jr.



Enquanto a figura 3 mostrou valores de DEP/DEP_{TOT} para diferentes períodos, a tabela 2 apresenta esse valor para todo o período de operação dos reservatórios. Além disso, a tabela 2 também apresenta valores de descarga sólida total e deposição de sedimentos nos reservatórios. Nota-se que, considerando todo o período estudado, o reservatório Capivara aparece como aquele que mais retém sedimentos. Mesmo com uma série de apenas oito anos e experimentando um período seco, o reservatório Governador Jayme Canet Jr. ocupa a segunda posição.

A tabela 2 ainda permite observar que a deposição de sedimentos está diretamente relacionada com a carga afluyente. Embora esse não seja o único elemento que determine o processo de deposição, fica claro que quanto maior a carga que chegar, maior a carga que deposita. Isso explica bem as diferenças depositadas nos reservatórios Canoas 1 e Canoas 2, construídos no mesmo período. A

diferença de aporte de sedimentos nos dois é considerável, cerca de quatro vezes. Por fim, essa tabela nos mostra a alta eficiência de retenção dos reservatórios com capacidade de retenção. Praticamente toda a carga de sedimentos que chega aos reservatórios Jurumirim, Chavantes, Capivara e Governador Jayme Canet Jr. fica retida nos reservatórios.

Tabela 2 – Valores médios de transporte e deposição de sedimentos totais nos reservatórios estudados. Os valores foram computados a partir do ano de operação dos reservatórios, conforme tabela 1.

	QST (kt/ano)	DEP (kt/ano) ¹	DEP/ DEP _{TOT} ²
SALTO GRANDE*	462	257	2%
JURUMIRIM*	1.209	1.201	10%
CHAVANTES*	1.142	1.124	9%
CAPIVARA*	5.066	4.626	38%
TAQUARUÇU	874	302	2%
CANOAS 2	281	67	1%
CANOAS 1	1.169	472	4%
ROSANA	1002	500	4%
PIRAJU	17	6	0%
OURINHOS	22	4	0%
GOV. J. C. JR.	4.800	3.759	31%

* Reservatórios que iniciaram sua operação antes do início da simulação.

¹ DEP – Valor depositado no reservatório desde o início de sua operação.

² DEP_{TOT} - Volume total depositado nos 11 reservatórios apresentados na tabela.

CONCLUSÃO

A cascata de reservatórios construída ao longo do rio Paranapanema tem afetado o transporte e a deposição de sedimentos no mesmo. Isso pode ser considerado a partir de uma análise minuciosa da quantidade relativa de sedimentos depositados ao longo do tempo nos reservatórios da bacia e também da contribuição de alguns afluentes importantes do rio Paranapanema. Os impactos positivos é que o desmatamento da região fazia com que as águas ficassem mais turvas afetando os sistemas de tratamento de água, enquanto as retenções poderia diminuir o aporte de nutrientes e matéria orgânica adsorvidos aos sedimentos, afetando os ecossistemas aquáticos. Além disso, a retenção de sedimentos em mais reservatórios garante maior vida útil média à cascata de geração de energia.

Uma análise detalhada do reservatório Capivara mostrou que este retinha 66% dos sedimentos depositados em todos os reservatórios da bacia entre 1985 e 1998. Esse valor reduziu para 55% entre 1999 e 2011, após a construção dos reservatórios Canoas 1 e 2, Piraju e Ourinhos, e para 29% após a construção do reservatório Governador Jayme Canet Jr., em 2012.

Entre 2012 e 2019 o reservatório Governador Jayme Canet Jr. reteve cerca de 3.759 kt/ano, que poderiam ter sido propagadas para jusante e depositadas, em sua grande maioria, no reservatório Capivara. Essa grande retenção e a redução do valor da deposição relativa de 55% para 29% (quase metade) mostra que, descontando os anos passados, possivelmente a vida útil do reservatório Capivara quase dobrou a partir da construção do reservatório Governador Jayme Canet Jr.

REFERÊNCIAS

- Beck, H.E., van Dijk, A.I.J.M., de Roo, A., Dutra, E., Fink, G., Orth, R., Schellekens, J., 2017. Global evaluation of runoff from 10 state-of-the-art hydrological models [dataset]. *Hydrol Earth Syst Sci* 21, 2881–2903.
- 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. *Global and Planetary Change*, 115, 44–58. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.01.011>
- Fagundes, H.O., Fan, F.M., Paiva, R.C.D., Siqueira, V.A., Buarque, D.C., Kornowski, L.W., Laipelt, L., Collischonn, W., 2021. Sediment flows in South America supported by daily hydrologic-hydrodynamic modeling. *Water Resour. Res.* 57. <https://doi.org/10.1029/2020WR027884>.
- Fagundes, H.O., Fleischmann, A.S., Fan, F.M., et al., 2022. Human-induced changes in South American sediment fluxes from 1984 to 2019. *ESS Open Arch.* <https://doi.org/10.22541/essoar.167458052.24247738/v1> January 24, 2023.
- Gardner et al 2023. Human activities change suspended sediment concentration along rivers *Environ. Res. Lett.* 18 064032 DOI 10.1088/1748-9326/acd8d8.
- Huang, C., Zhou, Z., Teng, M., Wu, C., & Wang, P., 2020. Effects of climate, land use and land cover changes on soil loss in the Three Gorges Reservoir area, China. *Geography and Sustainability*, 1(3), 200–208. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2020.08.001>
- Julien, P.Y., 2010. *Erosion and Sedimentation*, Second. ed. Cambridge University Press, New York.
- Lane, E. W., 1995 Stable channel design, *Trans., Am. Soc. Civil Eng.* v. 102, p. 1234–1260, 1955.
- Morris, G. L. and Fan, J., 1998. *Reservoir Sedimentation Handbook*, McGraw-Hill Book Co., New York.
- Shin, S., Pokhrel, Y., Miguez-Macho, G., 2019. High-resolution modeling of reservoir release and storage dynamics at the continental scale. *Water Resour.Res.* 55, 787–810.
- Skofronick-Jackson, G., Petersen, W.A., Berg, W., Kidd, C., Stocker, E.F., Kirschbaum, D.B., Kakar, R., Braun, S.A., Huffman, G.J., Iguchi, T., Kirstetter, P.E., Kummerow, C., Meneghini, R., Oki, R., Olson, W.S., Takayabu, Y.N., Furukawa, K., Wilhelm, T., 2017. The global precipitation measurement (GPM) mission for science and Society [dataset]. *Bull Am Meteorol Soc* 98, 1679–1695. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00306.1>
- 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*, 308(5720), 376–380.
- Waters, D. K.; Lewis, S., 2017. Calculating sediment trapping efficiency for reservoirs in series. 22nd International Congress on Modelling and Simulation, Hobart, Tasmania, Australia.
- Wei, X., Sauvage, S., Le, T. P. Q., Ouillon, S., Orange, D., Vinh, V. D., & Sanchez-Perez, J. M., 2019. A modeling approach to diagnose the impacts of global changes on discharge and suspended sediment concentration within the Red River Basin. *Water (Switzerland)*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/w11050958>
- Yigzaw, W., Li, H.-Y., Demissie, Y., Hejazi, M.I., Leung, L.R., Voisin, N., Payn, R., 2018. A New Global Storage-Area-Depth Dataset for Modeling Reservoirs in Land Surface and Earth System Models [dataset]. *Water Resources Research TECHNICAL* 54, 10,372–10,386.