

Influência da cascata de reservatórios na dinâmica dos sedimentos a partir da modelagem hidrossedimentológica: Estudo da bacia do Alto rio Paraguai - Brasil

Influence of reservoir cascades on sediment dynamics based on hydrosedimentological modeling: Study of the Upper Paraguay River Basin - Brazil

Warlen Libreton de Oliveira*, Adilson Pinheiro**

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Fundação Universidade Regional de Blumenau, pesquisa@warlenlibreton.com.br

**Departamento em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, adilson.pinheiro@ufsc.br

<http://dx.doi.org/10.5380/raega.v62i1.97402>

Resumo

O armazenamento de água é importante na otimização do uso dos recursos hídricos, como geração de energia, abastecimento humano e regularização de vazão. Diversos estudos analisam a influência dos reservatórios em processos hidrossedimentológicos, destacando impactos ambientais e a alteração na dinâmica dos cursos d'água. Contudo, a maioria desses estudos se concentra em reservatórios individuais, deixando de lado os efeitos cumulativos das barragens. Esse trabalho visa preencher essa lacuna, analisando a dinâmica dos sedimentos em sistemas de reservatórios em cascata. Foram selecionadas cinco bacias hidrográficas na região do Alto rio Paraguai, com base na presença de reservatórios. O modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tools) foi utilizado para a simulação hidrossedimentológica. Observou-se que a criação de cascatas de reservatórios impacta significativamente a dinâmica dos sedimentos, com destaque para a retenção nos reservatórios a montante, especialmente nos maiores. A localização dos reservatórios nas bacias mostrou-se fundamental no transporte de sedimentos ao longo dos cursos d'água. Além disso, foram observadas alterações na distribuição espacial da produção de sedimentos, com inversão de padrões em algumas cascatas. As simulações proporcionaram uma compreensão detalhada do comportamento dos sedimentos, oferecendo subsídios importantes para gestores na tomada de decisões sobre a instalação de novas hidrelétricas, indo além dos estudos tradicionais de avaliação de impacto ambiental.

Palavras-chave:

Sedimentologia, Reservatórios em cascatas, Sinergia de reservatórios, SWAT model.

Abstract

Water storage is crucial to optimize water resources, such as power generation, human supply, and flow regulation. Several studies analyze the influence of reservoirs on hydrosedimentological processes, highlighting environmental impacts and changes in the dynamics of watercourses. However, most of these studies focus on individual reservoirs, neglecting the cumulative effects of dams. This research aims to fill this gap by analyzing sediment dynamics in cascade reservoir systems. Five river basins in the Upper river Paraguay region were selected based on the presence of reservoirs, and the SWAT (Soil and Water Assessment Tools) model was used for hydrosedimentological modeling. It was observed that the creation of reservoir cascades significantly impacts sediment dynamics, with emphasis on retention in upstream reservoirs, especially in the largest ones. The location of reservoirs in the basins proved to be crucial in modifying sediment transport along watercourses. Furthermore, changes in the spatial distribution of sediment production were observed, with inversion of patterns in some cascades. The simulations provided a detailed understanding of sediment behavior, offering important support for managers in making decisions about the installation of new hydroelectric plants, going beyond traditional environmental impact studies.

Keywords:

Sedimentology, Reservoirs in cascades, Reservoir synergy, SWAT model.

I. INTRODUÇÃO

O aumento da construção de usinas hidrelétricas no Brasil, fundamentado na necessidade de energia para o desenvolvimento do país, tem instalado diversos reservatórios em cascata. Esses reservatórios e o uso da terra desempenham um papel crucial na dinâmica dos sedimentos em bacias hidrográficas (Hoffmann, 2017). Compreender a dinâmica dos sedimentos em reservatórios quando estão em cascadas no sistema fluvial e as principais influências no processo contribuirá para uma melhor gestão dos recursos hídricos (Peng; Ji; Gu, 2014).

Os sistemas de reservatórios em cascata podem ser definidos de diversas formas, conforme discutido por vários autores. Cardoso-Silva et al. (2017) destacaram que esses sistemas se aplicam quando existem múltiplos reservatórios em diferentes rios de uma mesma bacia hidrográfica. Ward e Stanford (1983), caracterizam um sistema de reservatórios em cascata como uma "descontinuidade serial", que pode ser avaliada por meio de parâmetros físicos (como temperatura), fenômenos biológicos (padrões de abundância de espécies) ou níveis de ecossistemas (fotossíntese/respiração), com a descontinuidade medida pela distância longitudinal de um parâmetro alterado pela regulação do fluxo. De acordo com Tundisi e Tundisi (2008), um sistema de reservatórios em cascata consiste em múltiplas barragens hidrológicamente conectadas, operando de forma inter-relacionada para alcançar objetivos comuns, como o abastecimento de água e a geração de energia. Esses autores acrescentam que "reservatórios em cascata" referem-se a uma sequência de

reservatórios no mesmo curso de água, enquanto um "sistema de múltiplos reservatórios" se refere a reservatórios localizados em diferentes seções de um rio, onde as vazões são compartilhadas entre eles.

A carga de sedimentos tem um papel importante no gerenciamento de bacias hidrográficas, especialmente na combinação com a precipitação e de reservatórios sobre esse fenômeno (Li et al., 2020). Ren et al. (2020) observaram que a construção de reservatórios em cascata contribuiu para as mudanças no tempo de propagação da vazão de pico e da concentração máxima de sedimento para alguns subperíodos. Utilizando o modelo de regressão linear RSTI (Rainfall-augmented sediment trapping), os pesquisadores investigaram a mudança na carga de sedimento a jusante do reservatório. O modelo Particle Swarm Optimization aliado ao algoritmo *catfish effect algorithm* forneceu uma abordagem eficaz para obter os benefícios máximos do controle de fluxo. Foi observado um aumento na taxa de perda de assoreamento a partir do aumento do tempo de detenção no período de recessão da enchente (Peng; Ji; Gu, 2014). A construção de reservatórios em cascata altera significativamente as condições naturais a montante e a jusante de um rio, impactando diretamente a dinâmica do transporte de sedimentos suspensos, especialmente durante eventos extremos como inundações (Ren et al., 2020; Zhang et al., 2022). A carga de sedimento e o fluxo de água diminuiu significativamente devido aos efeitos de aprisionamento dos reservatórios em cascata, contribuindo com 88% e 90% respectivamente (Fan et al., 2023). Com base em observações nas instalações atuais, bem como na distribuição espacial das instalações futuras, Fantin-Cruz et al. (2020) estimaram os impactos de possíveis novas instalações hidrelétricas no transporte de sedimentos, onde, mais da metade das instalações atuais reteve sedimentos suspensos: 14 das 29 instalações mostraram mais de 20% de retenção líquida de sedimentos suspensos, duas outras retiveram entre 10 e 20%, sete ficaram dentro de 10% e seis apresentaram mais de 10% de liberação líquida.

A bacia do Alto Paraguai, cujos fluxos de água e de nutrientes são conduzidos para o Pantanal, possui uma importância para a gestão de recursos hídricos em prol da saúde dos ecossistemas. Essa região apresenta um conjunto amplo de temas críticos relacionados ao meio ambiente, resultando em ameaças e situações de conflito (ANA, 2018). Um desses temas críticos tem relação com o aumento de usinas hidrelétricas, com possibilidades na formação de várias cascatas de reservatórios. Até 2018, havia 47 usinas hidrelétricas em operação e com mais 138 projetos em construção, planejados, propostos ou identificados pelo governo como locais prospectivos para a mesma bacia (Fantin-Cruz et al., 2020). A organização não governamental Ecologia e Ação – ECOA, a partir de dados oficiais da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou um mapa interativo e atualizado em 2020 contendo entre várias informações, a distribuição das usinas hidrelétricas na

bacia do Alto Paraguai organizadas por fases, identificando 33 em operação, 13 em construção e 86 em estudo (ECOA, 2020).

Por ser um tema relativamente recente, os estudos sobre reservatórios em cascata têm focado predominantemente em aspectos pontuais e específicos para uma bacia, como: alocação ótima de armazenamento para aumento de geração de energia, quantificação dos efeitos de futuras mudanças ambientais que possam comprometer a geração de energia e otimização da operação complementar de reservatórios (Xie et al., 2024; Zhou et al., 2024; Zhu et al., 2024). Referente a qualidade de água como a influência da cascata nos padrões de distribuição e retenção de elementos biogênicos, metais pesados, temperatura, nutrientes, fluxo de nitrogênio e fósforo (Chen et al., 2024; Li et al., 2024; Sun et al., 2024; Wang et al., 2024; Zhao et al., 2024a, 2024b, 2024c; Zhao; Li; Li, 2024a, 2024b). Outros trabalhos voltados para regulação de reservatórios em inundações de degelo e avaliação na mudança no regime fluvial para hidrovia (Liu et al., 2024; Lu et al., 2024). No entanto, essas abordagens tem deixado uma lacuna importante na literatura, ao negligenciar possíveis influências externas ao ambiente dos reservatórios, como o uso e ocupação da terra nas bacias hidrográficas adjacentes, além de desconsiderar mais de uma bacia no mesmo contexto.

Nesse contexto, torna-se fundamental a modelagem dos sedimentos em bacias com características distintas, especialmente aquelas com sistemas de reservatórios em cascata. Essa abordagem permite uma análise mais abrangente das influências do uso e ocupação da terra e do próprio sistema de reservatórios na dinâmica dos sedimentos. Portanto, é essencial modelar sedimentos em bacias com características distintas, especialmente aquelas com sistemas de reservatórios em cascata. Essa abordagem permite uma análise mais abrangente das influências do uso da terra e do próprio sistema de reservatórios na dinâmica dos sedimentos. Assim, o objetivo deste artigo foi analisar como a cascata de reservatórios influencia a dinâmica dos sedimentos com base nas características das variáveis espaciais de uso da terra, solo e declividade e suas interações em diversas bacias dentro de um mesmo ecossistema, com atenção especial para áreas sensíveis, como o Pantanal.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo é delimitada pela região hidrográfica do Alto Paraguai, que inclui a drenagem para o Pantanal (Figura 1). Foram selecionadas regiões com reservatórios em cascata, além de algumas outras com reservatórios isolados para efeito de comparação. Na Figura 1, também são apresentados os reservatórios hidrelétricos, associados às bacias hidrográficas delimitadas para a simulação hidrossedimentológica.

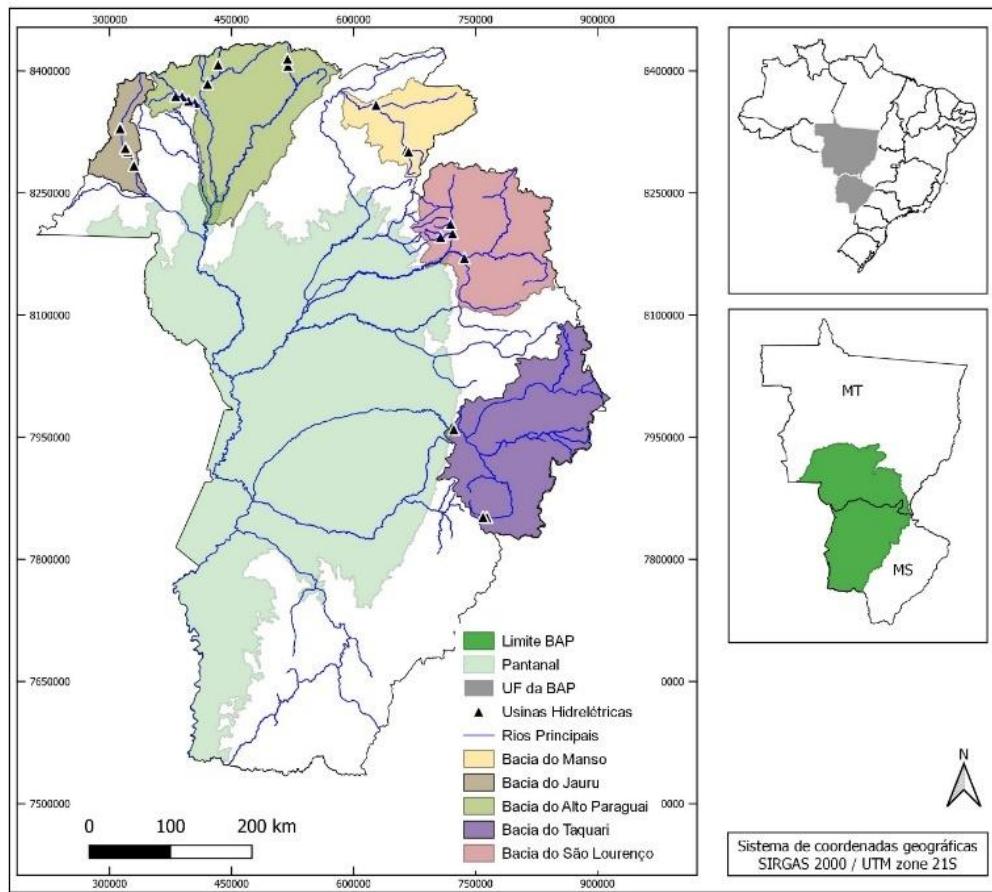


Figura 1– Área de estudo e diagrama unifilar dos rios e reservatórios hidrelétricos.

A modelagem hidrossedimentológica foi desenvolvida em três etapas principais. Na primeira etapa, preparou-se o ambiente de modelagem com a inclusão de mapas de uso da terra, tipos de solos, modelo digital de elevação e dados dos reservatórios (Quadro 2 – material suplementar), delimitando sub-bacias e unidades de resposta hidrológica (HRUs). Na segunda etapa, foram incluídos dados climáticos e registros de estações pluviométricas e fluviométricas, utilizando o software QGis e o plugin QSWAT. A terceira etapa envolveu a calibração e verificação dos parâmetros de calibração e simulação do modelo SWAT.

A calibração foi realizada manualmente, ajustando os parâmetros até alcançar um desempenho satisfatório. O ajuste do modelo foi feito comparando os dados simulados pelo SWAT com os dados observados, utilizando os índices Kling-Gupta Efficiency (KGE), Percentual de tendência (PBias) e coeficiente de correlação de Pearson. Os períodos de calibração e de validação bem como a quantidade de anos usados para aquecimento do modelo variaram para cada região (Tabela 1).

Tabela 1– Períodos de calibração e validação da modelagem.

Bacia	Período de Calibração	Período de Validação	Anos de Aquecimento
Jauru	1997-2006	2007-2013	1
Alto Paraguai	1994-2006	2007-2013	2
Manso	2007-2010	2011-2013	1
São Lourenço	2009-2009	2010-2012	1
Taquari	2004-2007	2008-2010	1

Fonte: Autor (2024).

Para a execução do modelo SWAT foi necessário a entrada de: Modelo Digital de Elevação (Figura 1 material suplementar), uso e ocupação da terra (Figura 2 - material suplementar) e tipos de solos (Figura 3 - material suplementar), onde a partir deles, o software gera as sub-bacias e as HRUs. As HRUs são as unidades básicas de simulação no modelo SWAT e representam áreas homogêneas dentro da bacia hidrográfica em termos de solos, uso e ocupação da terra e declividade. As classes de uso e ocupação da terra apresentadas na Figura 2 (material suplementar), são padrões do MAPBIOMAS (MAPBIOMAS, 2018). As séries históricas de precipitação, vazão e concentração de sedimentos foram obtidas através do sistema Hidroweb da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Os dados climáticos referente a temperatura, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento, não eram suficientes pelas bases observadas para os períodos de série histórica de interesse da pesquisa. Para evitar o processo de simulação automática desses valores pelo modelo SWAT, optou-se por usar os dados de satélite organizados pelos Centros Nacionais de Previsão Ambiental (NCEP) Reanálise do Sistema de Previsão do Clima (CFSR) nos Estados Unidos que possui uma série de 36 anos (1979 a 2014). O CFSR foi projetado e executado como um sistema global de alta resolução acoplado atmosfera-oceano-superfície terrestre-sistema de gelo marinho para fornecer a melhor estimativa do estado desses domínios. A distância entre os pontos de coleta de dados entre as latitudes e longitudes é de 0.3°. O site da CFSR disponibiliza os dados diários de precipitação, vento, umidade relativa e solar, em formato de arquivo do modelo SWAT para um determinado local e período de tempo (CFSR, 2021). A Figura 4 (material suplementar) representa a distribuição dos pontos das estações referente à vazão, sedimento e precipitação.

A série histórica de dados de vazão são monitoradas diariamente, diferente dos dados de sedimento que possui coleta em média 3 vezes ao ano. Nesse caso, foi necessário o preenchimento dos demais dias por meio da interpolação da correlação entre vazão e sedimento observados. Para a interpolação dos dados e preenchimento dos dias inexistentes para sedimento foi aplicado o método de regressão exponencial ou linear dependendo do melhor resultado. A regressão exponencial aplicada nos dados de sedimento para interpolação

está apresentada na Figura 6 (material suplementar) com demonstração dos gráficos de correlação, R^2 e equação da reta.

Os dados hidrológicos, climatológicos e dos reservatórios necessários para a execução da modelagem estão descritos nos quadros 1 e 2 e figura 4 do material suplementar. Os dados dos reservatórios foram obtidos junto a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) sob um pedido de protocolo solicitado pela Plataforma Integrada de Ouvidoria e Acesso à Informação – FALA.BR do Governo Federal. Os dados foram enviados em cópia de documentos oficiais das empresas responsáveis pelas usinas hidrelétricas, os quais foram organizados em função das informações necessárias para a modelagem.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A influência do uso e ocupação da terra na variabilidade de parâmetros do modelo, mudanças no fluxo de água e parâmetros de balanço hídrico também são identificadas usando uma estrutura de modelagem hidrológica (Sharma; Patel; Sharma, 2022). As simulações hidrossedimentológicas processadas no SWAT apresentaram resultados satisfatórios para as análises (Tabelas 2 e 3). Os hidrogramas e sedimentogramas gerados a partir das simulações (figuras 5 e 7 - material suplementar) representam o comportamento dos dados das bacias. Sendo a Figura 2, a representação da bacia do Alto Paraguai.

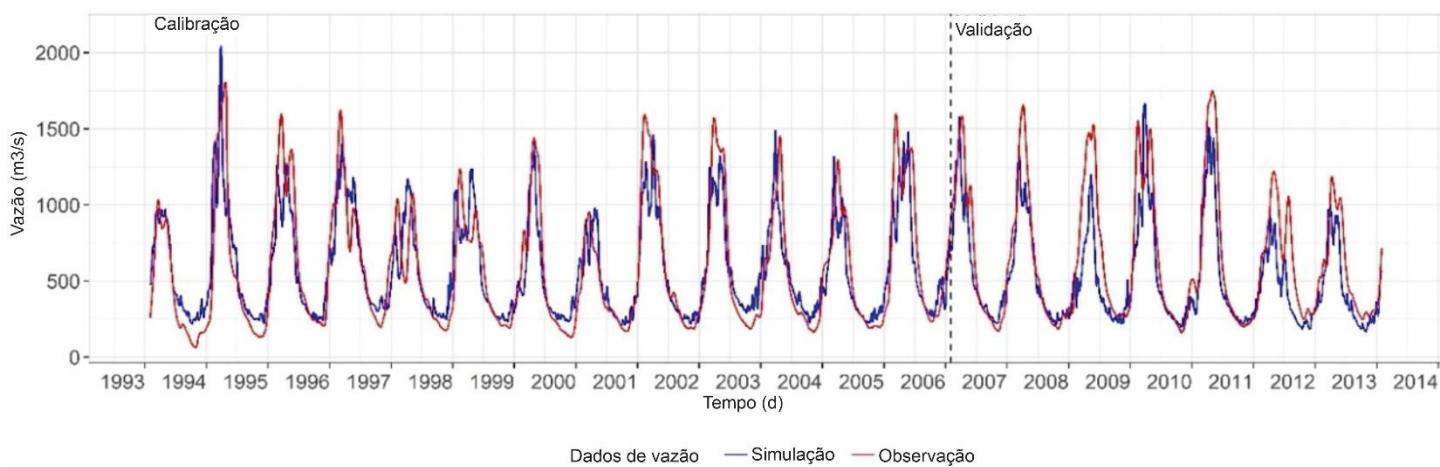


Figura 2 – Simulação para vazão referente a modelagem da bacia do rio Alto Paraguai.

As simulações de vazão da bacia do rio Jauru apresentam uma oscilação forte do início da simulação até o ano de 2003 e depois fica suavizado, especialmente para os picos de vazão. Esse comportamento está relacionado com o início de operação dos reservatórios. A simulação de vazão na bacia do Alto Paraguai apresenta uma regularidade geral em todo período, inclusive com um bom ajuste visual dos hidrogramas. Na

bacia do rio Manso, os dados de vazão apresentam valores muito baixos para os períodos de estiagem. Como ocorre em todo período, pode ser considerado como um comportamento normal da bacia. Esse comportamento também foi observado pela simulação na bacia do rio Cuiabá a qual se inclui a bacia do rio Manso (Baldissera, 2005). Não foram identificadas características especiais no comportamento dos dados de vazão da bacia do São Lourenço, sendo estes com as variações típicas das cheias e estiagens. Porém, foi uma das bacias mais difíceis de calibrar. Com a bacia do rio Taquari, apesar do hidrograma simulado acompanhar o hidrograma observado, existe uma diferença importante no período de estiagem. Os valores ficaram mais suavizados, com menos oscilações entre picos e recessões do que os valores do período de cheia. Os resultados das simulações para vazão indicam uma performance geralmente satisfatória do modelo hidrológico, com eficiências variando entre 0,51 e 0,69 durante os períodos de calibração e de validação (Tabela 3).

Tabela 2 – Resultados das simulações para vazão.

Bacias	Período	Calibração			Validação			
		KGE	pBias	Pearson	Período	KGE	pBias	Pearson
Jauru	1997-2006	0,66	0,03	0,69	2007-2013	0,55	0,13	0,63
Alto Paraguai	1994-2006	0,69	0,08	0,71	2007-2013	0,62	0,12	0,68
Manso	2007-2010	0,65	0,02	0,70	2011-2013	0,61	0,11	0,70
São Lourenço	2006-2009	0,57	0,14	0,75	2010-2012	0,52	0,16	0,69
Taquari	2004-2007	0,55	0,19	0,59	2008-2010	0,51	0,17	0,57

Fonte: Autor (2024).

Observa-se uma tendência de pequena redução na eficiência durante os períodos de validação em comparação com os períodos de calibração em todas as bacias, o que sugere uma capacidade de generalização do modelo hidrológico. Os valores de pBias indicam um pequeno viés positivo nas simulações, com média variando de 0,02 a 0,19, indicando que as estimativas tendem a ser ligeiramente superestimadas. Quanto ao coeficiente de correlação de Pearson, os valores oscilam entre 0,57 e 0,75, indicando uma boa relação linear entre os dados simulados e observados. Esses resultados indicam que o modelo hidrológico é capaz de reproduzir adequadamente as evoluções de vazões nas diferentes bacias, se considerado a aplicação em projetos menos restritivos. Os resultados apresentados pelos hidrogramas para as bacias do rio Alto Paraguai, Cuiabá e São Lourenço estão similares aos modelos calibrados pelo software MGB ((IPH, 2021)) e apresentados no projeto de implementação de práticas de gerenciamento integrado de bacias hidrográficas para o Pantanal (Allasia et al., 2015).

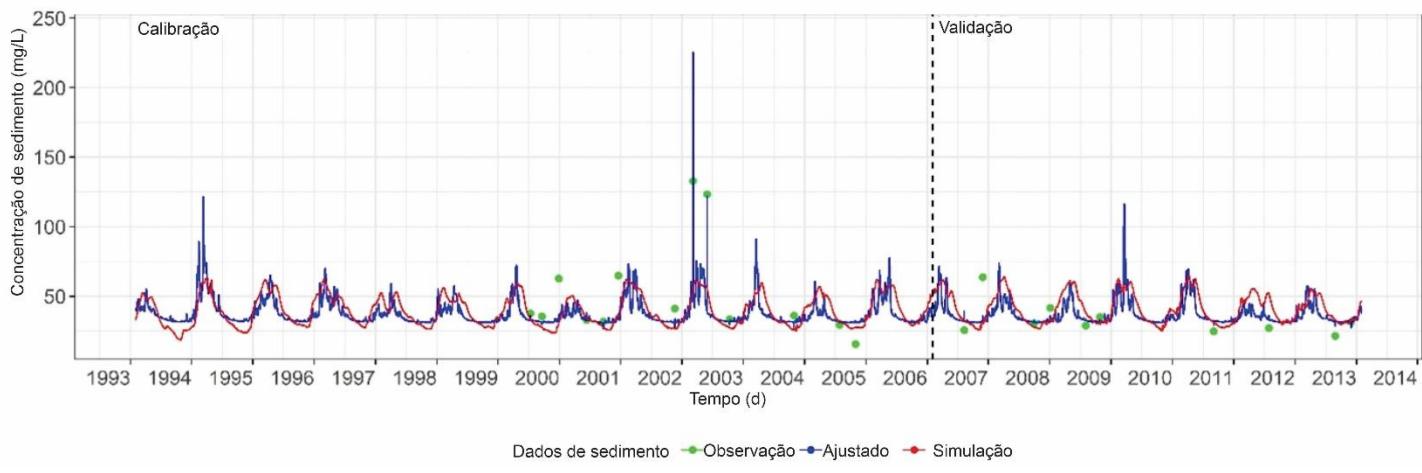


Figura 3 – Simulação para sedimento referente a modelagem das bacias Bacia do rio Alto Paraguai.

Nas análises da simulação das concentrações de sedimentos, observou-se que todos os valores simulados das bacias foram inferiores aos valores ajustados. Os dados simulados nos períodos de estiagem apresentam valores com reduzida variação. A bacia do Alto Paraguai resultou valores de picos de concentrações de sedimentos que são possíveis outliers. Outro ponto que chama a atenção dessa bacia, são os valores simulados nos períodos de estiagem, os quais estão sempre abaixo dos valores ajustados. Com uma certa semelhança com a bacia do rio Jauru, os valores simulados nos períodos de estiagem para a bacia do rio Manso apresentam reduzida variação. Para os valores nos períodos de cheia, as variações dos dados simulados acompanham os valores observados, apesar de estarem mais baixos em extensa parte do período. As variações dos dados simulados na bacia do rio São Lourenço em todo período e sem distinção entre cheias e estiagens acompanham os dados ajustados, porém com amplitudes dos dados simulados sempre menores que as amplitudes dos dados ajustados. Na bacia do rio Taquari, os dados ajustados e simulados têm comportamento regular apesar da variação dos dados na simulação serem menores que a variação nos dados ajustados. Ou seja, as oscilações dos picos estão com menor intensidade na simulação. É importante ressaltar que os dados ajustados para vazão são coletados diariamente, enquanto os dados de concentração de sedimento são interpolados, conforme descrito na metodologia, com base em amostragens realizadas em média de 3 a 4 vezes ao ano. Essa diferença na frequência de amostragem pode, em grande parte, explicar eventuais discrepâncias nas simulações das concentrações de sedimentos e ao mesmo tempo a dificuldade nas calibrações. Na Tabela 5 são apresentados os resultados da performance dos modelos através de índices aplicados.

Tabela 3 – Resultados das simulações das concentrações de sedimentos.

Bacia	Calibração				Validação			KGE entre dados observados e simulados
	Período	KGE	pBias	Pearson	Período	KGE	pBias	
Jauru	1997-2006	0,61	0,14	0,67	2007-2013	0,55	0,13	0,62
Alto Paraguai	1994-2006	0,63	0,06	0,70	2007-2013	0,59	0,10	0,63
Manso	2007-2010	0,59	-0,06	0,65	2011-2013	0,58	-0,12	0,62
São Lourenço	2006-2009	0,40	-0,04	0,64	2010-2012	0,39	-0,11	0,61
Taquari	2004-2007	0,58	-0,10	0,62	2008-2010	0,54	-0,12	0,60

Fonte: Autor (2024).

Os resultados das simulações para concentrações de sedimento revelam uma variação na eficiência do modelo sedimentológico, com valores variando entre 0,40 e 0,63 durante os períodos de calibração e validação. Em geral, nota-se uma tendência de desempenho inferior em comparação com os resultados para vazão, o que é esperado e compreensível, especialmente devido à escassez de dados observados, como discutido anteriormente. Durante os períodos de calibração, os valores de eficiência para sedimento indicaram uma capacidade razoável do modelo em reproduzir as variações observadas. No entanto, durante os períodos de validação, a eficiência diminui ligeiramente, variando entre 0,39 e 0,59, o que sugere uma capacidade reduzida do modelo em prever os padrões de produção e transporte de sedimentos. Os valores de pBias indicam um viés negativo nas simulações, com média variando de -0,12 a 0,14, indicando uma tendência de subestimação nas estimativas de sedimento. Quanto ao coeficiente de correlação de Pearson, os valores oscilam entre 0,61 e 0,70, indicando uma relação moderada a forte entre os dados simulados e observados.

A eficiência do modelo também foi avaliada com base exclusivamente nos dados observados de sedimento, já que a maior parte dos dados foi ajustada por regressão. Apesar da diferença significativa na quantidade de dados observados em relação aos ajustados, os modelos apresentaram um bom ajuste. Os valores apresentados na última coluna da Tabela 5 demonstram esse desempenho, onde pode-se observar também que somente na bacia do Taquari o desempenho da série de dados observados foi inferior ao da série ajustada.

Na bacia do Alto Paraguai existe um equilíbrio na distribuição dos valores observados quando comparados com os valores simulados. Cerca de 60% dos valores simulados estão levemente menores que os valores observados. Com uma distribuição ainda mais equilibrada entre os valores observados e simulados na bacia do Manso comparada com a bacia Alto Paraguai, os valores simulados estão 50% acima dos valores observados. Com as mesmas análises anteriores referente, as bacias do São Lourenço e Taquari, tiveram 71% e

100% dos valores simulados abaixo dos valores observados respectivamente. Essa discrepância pode ser interpretada pelo menor desempenho do modelo em relação aos dados observados e simulados apresentados na Tabela 5. Com esses resultados, ressalta a importância de investir nos monitoramentos de sedimento possibilitando o aumento nas medições para que as séries históricas tenham mais relevância nos modelos e trazem melhores simulações.

A taxa de produção de sedimento gerada pelas simulações foram espacializadas em função das HRUs. Esses valores foram obtidos a partir do arquivo OUTPUT.STD de cada bacia e tratado para adequação da estrutura. Essa adequação foi para a aplicação no software R responsável pela maioria dos processos de análises dos resultados. Após o tratamento dos dados, os valores das taxas de produção de sedimento foram incluídos no shape file para a espacialização (Figura 4).

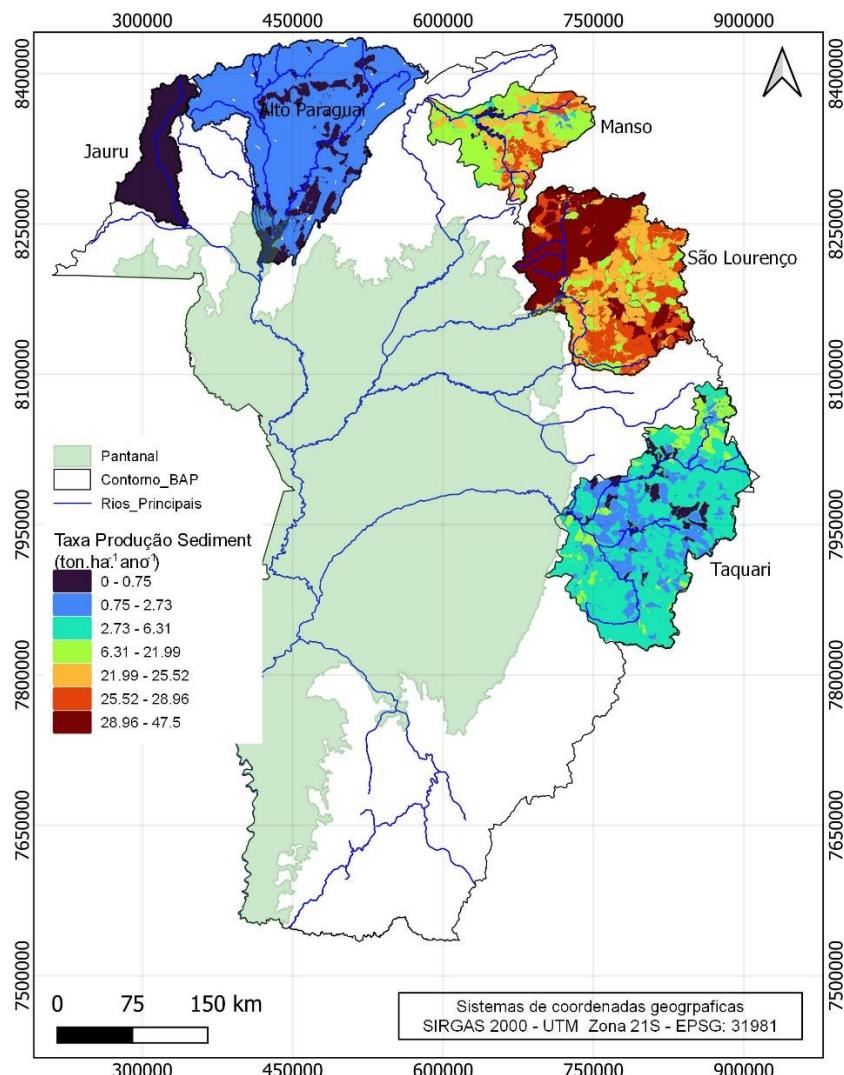


Figura 4 – Taxa de produção de sedimento das bacias modeladas para região hidrográfica do Alto Paraguai.

Ao examinar o uso e ocupação da terra em todas as bacias (Quadro 3 – material suplementar), foi observado que as taxas mais elevadas de produção de sedimentos ocorrem em bacias com maior extensão de áreas agrícolas, atingindo 7%, 8% e 16% para as bacias de Manso, Taquari e São Lourenço, respectivamente. Embora as áreas agrícolas representem uma pequena fração da paisagem em termos relativos, essa observação destaca sua influência no processo sedimentológico. A maior taxa de erosão do solo foi observada nas terras cultivadas, que aumentou de $40,86 \text{ ton.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ em 2000 para $53,9 \text{ ton.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ em 2020. Isto está relacionado com a expansão das terras agrícolas (Anley; Minale, 2024). É importante ressaltar que essa constatação não implica que a agricultura seja a principal responsável pela produção de sedimentos na bacia, mas sim que é uma variável altamente sensível. As terras cultivadas são naturalmente suscetíveis à geração de escoamento superficial, o que, por sua vez, aumenta a produção e o transporte de sedimentos, especialmente por estarem sem cobertura em parte da área (Kenea et al., 2021). Os demais usos e ocupação da terra estão essencialmente divididos entre pastagem e vegetação natural. A pastagem varia de 33% a 58% entre as bacias, enquanto a vegetação natural oscila entre 34 e 57%. (Quadro 3C – material suplementar).

A taxa de produção de sedimento variou entre $0,21$ a $47,5 \text{ ton.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, em todas as bacias. Porém com forte diferença entre elas, especialmente entre Jauru e Alto Paraguai e as demais, Manso, São Lourenço e Taquari. A classificação com 7 faixas para taxa de produção de sedimento apresentadas na Figura 4 foi para possibilitar a visão da bacia do rio Jauru que apresentou valores bem abaixo em relação as demais. Fica evidente essa diferença quando observada os intervalos das taxas de cada bacia (Figura 5).

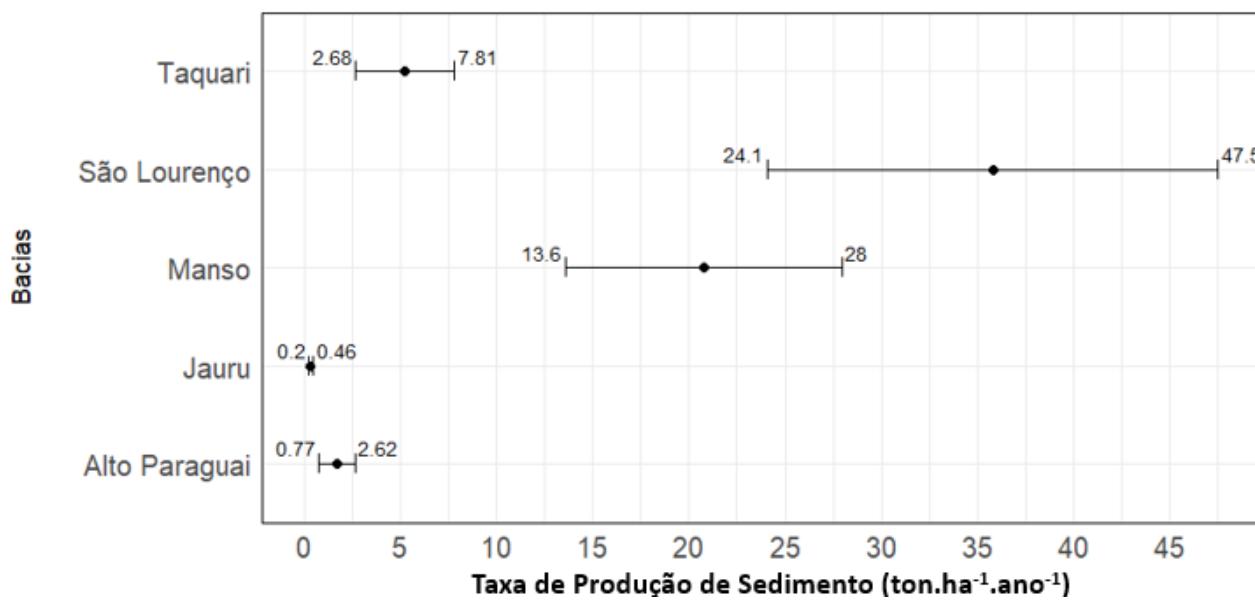


Figura 5 – Intervalo para taxas de produção de sedimento em cada bacia.

Os intervalos observados para as taxas de produção de sedimento revelam uma diversidade significativa, indicando que a amplitude desses valores não está necessariamente relacionada à área das bacias. Esse fenômeno é claramente ilustrado pela bacia do Alto Paraguai, que, apesar de ser a maior em extensão territorial comparado com as demais, apresenta a segunda menor amplitude de taxa de produção de sedimento. Além disso, ao considerar o intervalo das taxas de produção de sedimento em todas as bacias simuladas, destaca-se uma diferença extremamente acentuada quando se compparam os valores máximos das bacias com a menor taxa observada. A bacia do Jauru registra a maior taxa de 0,46 ton.ha⁻¹.ano⁻¹, enquanto as maiores taxas das demais bacias são significativamente maiores: a bacia do Alto Paraguai atinge uma taxa de 2,62 ton.ha⁻¹.ano⁻¹, representando uma diferença de 5,7 vezes em relação à taxa do Jauru. A bacia do Taquari apresenta uma taxa 16,9 vezes maior, a bacia do Manso é 60 vezes maior, e a bacia do São Lourenço resulta uma taxa 103 vezes superior, sempre comparada com a maior taxa da bacia do Jauru. Esses valores indicam a necessidade de uma análise detalhada em cada bacia para compreender os fatores que influenciam essas disparidades nas taxas de produção de sedimento.

Produção de sedimentos acumulado na saída dos reservatórios

Espera-se que os reservatórios desempenhem o papel de reter os sedimentos produzidos em suas áreas de drenagem ao longo do tempo, em função da taxa de produção, como observado por fan et al. 2023. Para compreender essa dinâmica, foram construídos gráficos acumulativos de sedimento na saída dos reservatórios, permitindo a análise do comportamento das curvas. Como os dados são acumulativos, espera-se que as linhas sejam crescentes ao longo do tempo.

Foram simuladas cinco bacias no estudo, cada uma com seus respectivos reservatórios. Para cada bacia, foi construído um gráfico específico: bacia do rio Jauru, com 5 reservatórios (Figura 6A); bacia do Alto Paraguai, com 7 reservatórios, sendo a cascata 1 (Figura 6B) e cascata 2 (Figura 6C); bacia do rio Manso, com 3 reservatórios (Figura 6D); bacia do rio São Lourenço, com 5 reservatórios (Figura 6E); bacia do rio Taquari, com 3 reservatórios (Figura 6F).

Esses gráficos permitem visualizar e analisar o comportamento dos sedimentos acumulados na saída dos reservatórios ao longo do tempo, demonstrando alteração nas condições naturais a jusante do rio, observado também por Ren et al. 2020; zhang et al. 2022.

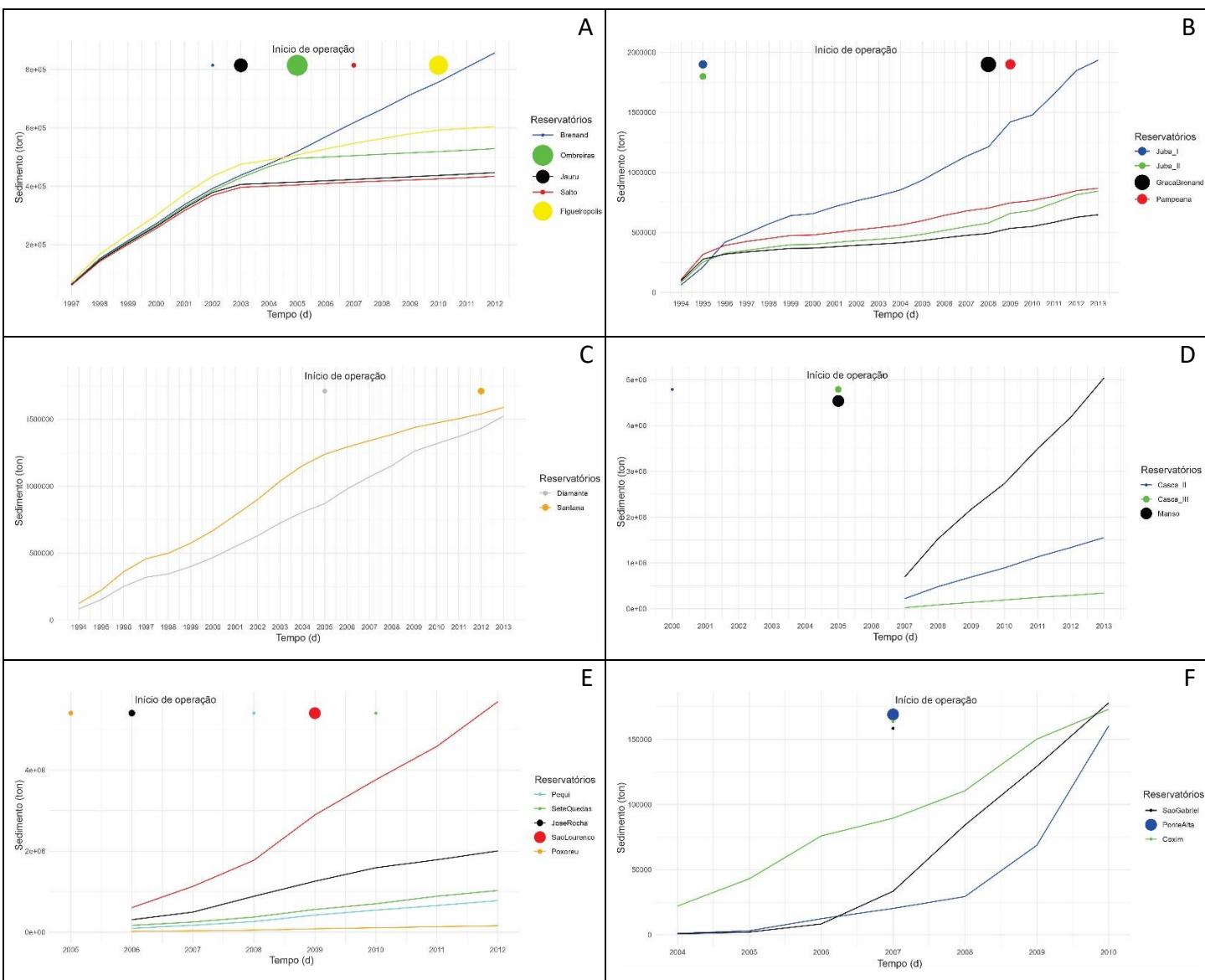


Figura 6 – Produção de sedimento acumulado nas saídas dos reservatórios - A) Bacia do rio Jauru – B) Bacia do Alto Paraguai - Cascata 1 – C) Bacia do Alto Paraguai - Cascata 2 – D) Bacia do rio Manso – E) Bacia do rio São Lourenço – F) Bacia do rio Taquari.

A primeira observação importante sobre as bacias e seus reservatórios foi a formação de cascatas. Na bacia do rio Jauru, todos os reservatórios formam uma única cascata (Figura 6A). Na bacia do Alto Paraguai, existem duas cascatas: a primeira é composta pelos reservatórios Jubá I, Jubá II, Graça Brenand e Pampeana, nessa ordem de montante a jusante (Figura 6B); a segunda cascata é formada pelos reservatórios Diamante e Santana, também nessa ordem de montante a jusante (Figura 6C). A bacia do Rio Manso, com três reservatórios, apresenta uma cascata considerando apenas os reservatórios Casca II e Casca III (Figura 6D). Na bacia do rio São Lourenço, não há formação de cascata, pois os reservatórios estão distribuídos por toda a bacia, sem influências

mútuas significativas (Figura 6E). Por fim, a bacia do rio Taquari possui uma cascata formada pelos reservatórios São Gabriel e Ponte Alta (Figura 6F).

Os reservatórios Brenand, Ombreiras, Jauru, Salto e Figueirópolis (na bacia do rio Jauru), assim como os reservatórios Jubá I e Jubá II (na bacia Alto Paraguai), apresentaram um comportamento típico de influência sobre a dinâmica dos sedimentos. Observa-se uma redução na produção de sedimentos a jusante de cada reservatório após o ano de início de sua operação, o que indica a efetiva retenção de sedimentos por esses reservatórios. Apesar da reta de sedimento acumulado do reservatório Brenand não transparecer mudança significativa, existe sim uma pequena alteração no ano de início de operação. Essa pequena diferença se justifica pelo tamanho do reservatório. Não foi possível fazer inferências sobre a influência dos reservatórios na bacia do rio Manso, pois os dados de modelagem são posteriores às datas de início de operação desses reservatórios. Além disso, os reservatórios das bacias do rio São Lourenço, e rio Taquari, Pampeana, Graça Brenand, Santana e Diamante (bacia do Alto Paraguai), não demonstraram influência significativa na dinâmica dos sedimentos em função das datas de início de operação.

A análise da dinâmica de sedimentos em função das posições geoespaciais dos reservatórios em cascata revela elementos importantes. Embora não haja uma mudança significativa na curva de sedimento acumulado no reservatório Brenand, uma leve redução entre 2002 e 2003 sugere retenção de sedimentos, o que influencia os reservatórios Jauru e Salto, situados a jusante. O reservatório Brenand, com apenas 4,5 hectares de área e 42 hm³ de volume, explica esse comportamento. O reservatório Jauru, com 380 hectares e 250 hm³, retém sedimentos que afetam os reservatórios Salto e Figueirópolis. O reservatório Salto responde de forma semelhante ao Jauru, como indicado pelas curvas paralelas de sedimentos acumulados. Esse padrão se justifica pela proximidade espacial do Salto logo após o Jauru. Da mesma forma, os reservatórios Jubá I e Jubá II influenciam diretamente os a jusante, enquanto Graça Brenand e Pampeana não alteram a dinâmica dos sedimentos logo após o início das operações.

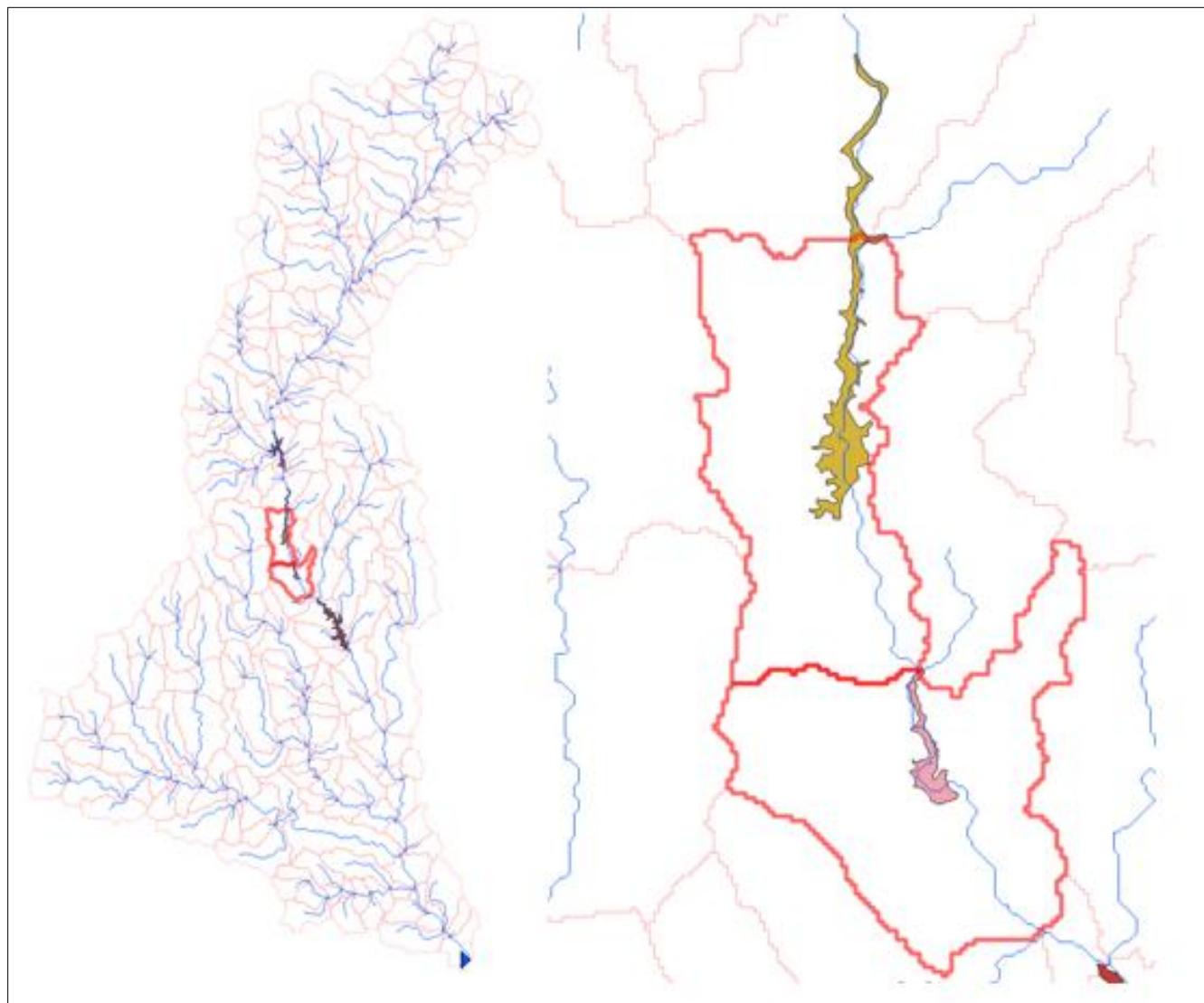


Figura 7 – Bacia do rio Jauru com destaque para os reservatórios Jauru e Salto.

Produção de sedimentos na saída dos reservatórios

Nesse tópico é apresentado a dinâmica dos sedimentos em cada reservatório das bacias simuladas, considerando a produção não acumulada nas saídas dos reservatórios para novas observações.

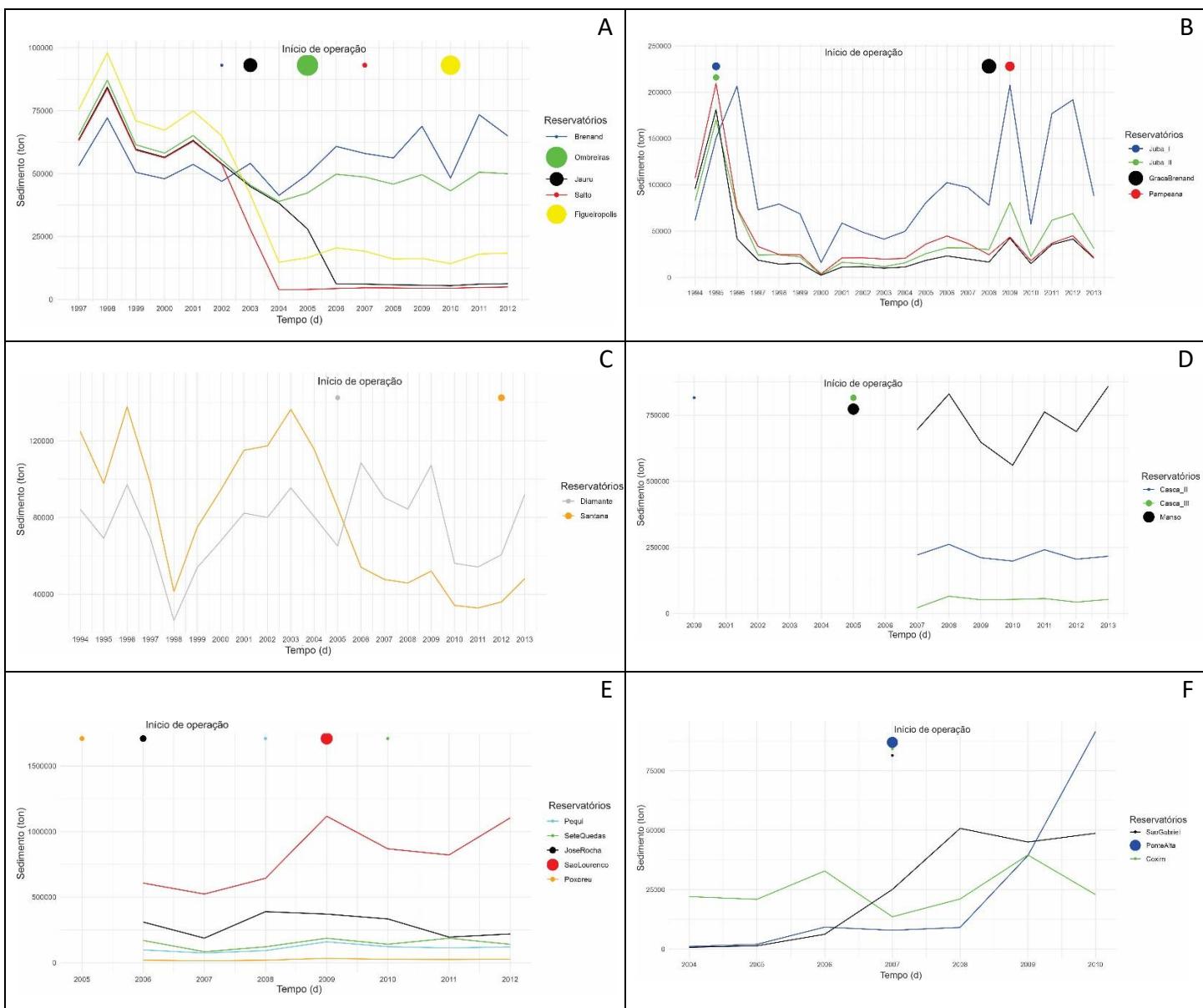


Figura 8 – Produção de sedimento não acumulado - A) Bacia do rio Jauru – B) Bacia do Alto Paraguai – Cascata 1 - C) Bacia do rio Alto Paraguai - Cascata 2 – D) Bacia do rio Manso - E) Bacia do rio São Lourenço – F) Bacia do rio Taquari.

Observa-se que todos os reservatórios a montante de uma cascata apresentaram maior produção de sedimento, mesmo com uma menor área de drenagem, o que comprova a retenção de sedimentos.

O reservatório Ombreiras (Figura 8A) apresentou uma retenção importante de sedimento, onde após o ano de início de operação faz com que os reservatórios a jusante tenham uma redução significativa no registro de produção de sedimentos.

Outro destaque importante é a cascata 2 da bacia do Alto Paraguai (Figura 8C). Antes da implantação dos reservatórios Diamante e Santana, a produção de sedimento nas subbacias era proporcional a área de

drenagem. No entanto, após a implantação do reservatório Diamante, esse comportamento se inverteu, demonstrando claramente a retenção de sedimentos. Mesmo sendo um pequeno reservatório, com 49 hectares de área e 75 hm³ de volume (Quadro 2C – material suplementar), o reservatório Diamante mostrou-se capaz de reter sedimentos.

A cascata na bacia do rio Manso formada pelos reservatórios Casca II e Casca III (Figura 8D) também demonstra uma boa capacidade de retenção de sedimento. A subbacia mais a jusante do reservatório Casca II deveria ter maior produtividade de sedimento por ter maior área de drenagem. Porém o reservatório Casca III com 32 hectares de área e 124 hm³ de volume consegue reter boa parte dos sedimentos.

Outras observações isoladas podem ser feitas. Na bacia do rio São Lourenço (Figura 8E), que não possui uma formação de cascata de reservatórios, a dinâmica de sedimento acompanha diretamente a relação com a área de drenagem. Onde as maiores produções de sedimento referem-se às maiores áreas de drenagem. Foi necessário aplicar uma escala diferente de valores para observar o comportamento dos sedimentos no reservatório Poxoréu, o qual possui uma área de drenagem muito pequena e, consequentemente, uma baixa produção de sedimentos.

Essas análises destacam a importância da configuração e localização dos reservatórios na retenção de sedimentos e na modificação da dinâmica ao longo dos cursos d'água, podendo contribuir com o gerenciamento dos reservatórios como sugerido por Li et al. (2020).

IV. CONCLUSÕES

A formação de cascatas de reservatórios foi um fenômeno significativo observado em várias bacias, onde a retenção de sedimentos foi evidente nos reservatórios a montante. Isso foi particularmente importante nos reservatórios de maior porte, que demonstraram uma capacidade efetiva de retenção de sedimentos, influenciando diretamente os reservatórios a jusante. A análise da produção de sedimentos não acumulada na saída dos reservatórios confirmou essa tendência, revelando uma maior produção de sedimentos nas subbacias mais a montante das cascatas, seguida por uma redução significativa nas subbacias a jusante.

A configuração e localização dos reservatórios emergiram como fatores cruciais na modificação da dinâmica dos sedimentos ao longo dos cursos d'água. Os reservatórios não apenas retiveram os sedimentos, mas também alteraram a distribuição espacial da produção de sedimentos, como evidenciado pela inversão de padrões observada em algumas cascatas. Esses resultados ressaltaram a importância de considerar os efeitos dos reservatórios na gestão e conservação dos recursos hídricos, especialmente em áreas onde a erosão e o

transporte de sedimentos representaram desafios significativos para a qualidade da água e a saúde dos ecossistemas aquáticos.

Os resultados das simulações, bem como todas as análises dos resultados dessa pesquisa, permitiram uma compreensão detalhada do comportamento dos sedimentos em diferentes áreas, destacando a influência das cascatas de reservatórios. Embora a complexidade das interações dos elementos que fizeram parte da modelagem hidrossedimentológica, associada a diversidade da paisagem foi possível obter resultados substanciais. Tais resultados traz um alerta para os gestores públicos, o quanto importante são estudos mais aprofundados para subsidiar tomadas de decisão no processo de autorização nas implantações de usinas hidrelétricas, não limitando apenas nos tradicionais estudos de impactos ambientais.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (Código de financiamento 001) e ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (processo 304475/2020-3).

V. REFERÊNCIAS

- ANA. Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica do Paraguai – PRH Paraguai: Resumo Executivo. Brasília: Setor Policial Sul, Área 5, Quadra 3, Blocos B, L, M e T, 2018.
- ANLEY, M. A.; MINALE, A. S. Modeling the impact of land use land cover change on the estimation of soil loss and sediment export using InVEST model at the Rib watershed of Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 34, n. February, p. 101177, 2024.
- BALDISSERA, G. C. Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para bacia hidrográfica do rio Cuiabá-MT. [s.l.] Universidade Federal do Mato Grosso - Cuiabá, 2005.
- CARDOSO-SILVA, S. et al. Metals in superficial sediments of a cascade multisystem reservoir: contamination and potential ecological risk. *Environmental Earth Sciences*, v. 76, n. 22, 2017.
- CFSR, C. F. S. R. Global Weather Data for SWAT. Disponível em: <<https://globalweather.tamu.edu/>>. Acesso em: 10 out. 2021.
- CHEN, Q. et al. Does a hydropower reservoir cascade really harm downstream nutrient regimes. *Science Bulletin*, v. 69, n. 5, p. 661–670, 2024.
- ECOA, E. E. A. Represas da Bacia do Alto Paraguai. Disponível em: <<https://arcg.is/1Kzm5z>>.
- FAN, J. et al. Effects of cascading reservoirs on streamflow and sediment load with machine learning reconstructed time series in the upper Yellow River basin. *Catena*, v. 225, n. February, p. 107008, 2023.
- FANTIN-CRUZ, I. et al. Further Development of Small Hydropower Facilities Will Significantly Reduce Sediment

- Transport to the Pantanal Wetland of Brazil. *frontiers in Environmental Science*, v. 8, 2020.
- G.ALLASIA, D. et al. MODELO HIDROLÓGICO DA BACIA DO ALTO PARAGUAI. Disponível em: <<https://ecoa.org.br/modelo-hidrologico-da-bacia-do-alto-paraguai/>>. Acesso em: 10 mar. 2024.
- HOFFMANN, T. C. P. Influência do uso da terra na produção de sedimentos em suspensão na porção superior da bacia hidrográfica do rio capivari, lapa/pr. 2017: Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.
- IPH, I. DE P. H. Hidrologia de Grande Escala. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/hge/mgb/o-que-e/>>.
- KNEA, U. et al. Hydrological responses to land use land cover changes in the fincha'a watershed, Ethiopia. *Land*, v. 10, n. 9, 2021.
- LI, L. et al. The cumulative effects of cascade reservoirs control nitrogen and phosphorus flux: Base on biogeochemical processes. *Water Research*, v. 252, n. September 2023, p. 121177, 2024.
- LI, R. et al. Investigating the downstream sediment load change by an index coupling effective rainfall information with reservoir sediment trapping capacity. *Journal of Hydrology*, v. 590, 2020.
- LIU, M. et al. Modelling the effect of cascade reservoir regulation on ice-jam flooding. *Journal of Hydrology*, v. 637, n. April 2023, p. 131358, 2024.
- LU, Y. et al. Changes of river regime and waterway downstream of a cascade of reservoirs on the upper Yangtze River. *International Journal of Sediment Research*, v. 39, n. 4, p. 615–628, 2024.
- MAPBIOMAS. Sistema de Validação e Refinamento de Alertas de Desmatamento com Imagens de Alta Resolução. Disponível em: <<http://mapbiomas.org>>.
- PENG, Y.; JI, C.; GU, R. A multi-objective optimization model for coordinated regulation of flow and sediment in cascade reservoirs. *Water Resources Management*, v. 28, n. 12, p. 4019–4033, 2014.
- REN, J. et al. Impact of the construction of cascade reservoirs on suspended sediment peak transport variation during flood events in the Three Gorges Reservoir. *Catena*, v. 188, n. December 2019, p. 104409, 2020.
- SHARMA, A.; PATEL, P. L.; SHARMA, P. J. Influence of climate and land-use changes on the sensitivity of SWAT model parameters and water availability in a semi-arid river basin. *Catena*, v. 215, n. April, p. 106298, 2022.
- SUN, Y. et al. Increasing cascade dams in the upstream area reduce nutrient inputs to the Three Gorges Reservoir in China. *Science of the Total Environment*, v. 926, n. December 2023, p. 171683, 2024.
- TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. Limnologia. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- WANG, J. et al. Cross-border impacts of cascade reservoirs on the temperature of the Lancang-Mekong river. *Ecological Indicators*, v. 160, n. March, 2024.
- WARD, J. V.; STANFORD, J. A. Serial Discontinuity Concept of Lotic Ecosystems. *Dynamics of Lotic Systems*, Ann Arbor Science, Ann Arbor, n. December, p. 29–42, 1983.
- XIE, Y. et al. Optimal allocation of flood prevention storage and dynamic operation of water levels to increase cascade reservoir hydropower generation. *Renewable Energy*, v. 228, n. May, p. 120676, 2024.
- ZHANG, P. et al. Effects of a cascade reservoir system on runoff and sediment yields in a River Basin of southwestern China. *Ecological Engineering*, v. 179, n. March, p. 106616, 2022.
- ZHAO, B. et al. Influence of cascade reservoirs on the distribution, transport, and retention patterns of biogenic elements in the Jinsha River. *Science of the Total Environment*, v. 951, n. August, p. 175535, 2024a.

- ZHAO, B. et al. Impact of cascade reservoirs on nutrients transported downstream and regulation method based on hydraulic retention time. *Water Research*, v. 252, n. November 2023, p. 121187, 2024b.
- ZHAO, Z. et al. Water quality assessment, possible origins and health risks of toxic metal(lloid)s in five cascade reservoirs in the upper Mekong. *Journal of Cleaner Production*, v. 441, n. December 2023, p. 141049, 2024c.
- ZHAO, Z.; LI, S.; LI, Y. Determining the priority control factor of toxic metals in cascade reservoir sediments via source-oriented ecological risk assessment. *Journal of Hydrology*, v. 631, n. December 2023, p. 130755, 2024a.
- ZHAO, Z.; LI, S.; LI, Y. Controlling factors and sources-specific ecological risks associated with toxic metals in core sediments from cascade reservoirs in Southwest China. *Science of the Total Environment*, v. 924, n. December 2023, p. 171570, 2024b.
- ZHOU, S. et al. Quantifying the effects of future environmental changes on water supply and hydropower generation benefits of cascade reservoirs in the Yellow River Basin within the framework of reservoir water supply and demand uncertainty. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 52, n. December 2023, p. 101729, 2024.
- ZHU, Y. et al. Optimizing complementary operation of mega cascade reservoirs for boosting hydropower sustainability. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 64, n. March, p. 103719, 2024.