

ANÁLISE E IDENTIFICAÇÃO DE PADRÕES NA DINÂMICA DOS SEDIMENTOS EM BACIAS DO ALTO PARAGUAI QUE DRENAM PARA O PANTANAL BRASILEIRO

ANALYSIS AND IDENTIFICATION OF PATTERNS IN SEDIMENT DYNAMICS IN UPPER PARAGUAY BASINS THAT DRAIN INTO THE BRAZILIAN PANTANAL

ANÁLISIS E IDENTIFICACIÓN DE PATRONES EN LA DINÁMICA DE SEDIMENTOS EN LAS CUENCAS DEL ALTO PARAGUAY QUE DRENAN HACIA EL PANTANAL BRASILEÑO

Warlen Librelon de Oliveira¹

 0000-0002-3815-0173
warlen@librelon.com.br

Adilson Pinheiro²

 0000-0001-8546-0046
adilson.pinheiro@ufsc.br

1 Doutorado em Engenharia Ambiental (2024) pela Universidade Regional de Blumenau – SC. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3815-0173>. E-mail: pesquisa@warlenlibrelon.com.br.

2 Doutorado em Física e Química Ambiental pelo Institut National Polytechnique de Toulouse, França (1995). Pós-Doutorado no Institut de Mécaniques de Fluides de Toulouse (1996) e Cemagref (2006). Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8546-0046>. E-mail: adilson.pinheiro@ufsc.br.

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).

Artigo recebido em julho de 2025 e aceito para publicação em novembro de 2025.

RESUMO: O estudo da dinâmica de sedimentos em bacias hidrográficas é crucial para a compreensão dos processos erosivos e suas implicações ambientais. Este artigo se concentra na análise e identificação de padrões na produção de sedimentos na bacia do Alto Paraguai, que drena para o Pantanal. A pesquisa visa entender como variáveis espaciais, como uso da terra, tipo de solo e declividade, influenciam na taxa de produção de sedimentos. A metodologia incluiu modelagem hidrossedimentológica de cinco bacias para analisar o comportamento da taxa de produção de sedimentos em relação às variáveis espaciais, correlação de dados, correlação espacial e a avaliação da importância relativa dessas variáveis usando Redes Neurais Artificiais (RNA). Os resultados indicaram que a agricultura é a maior influenciadora na produção de sedimentos, seguida por pastagem e vegetação natural. A produção de sedimentos tende a aumentar com a declividade, embora de forma não linear. Solos como Neossolo, Argissolo e Latossolo mostraram-se mais suscetíveis à erosão. A análise espacial revelou dependência significativa entre sub-bacias, com as maiores taxas de produção observadas nas bacias de São Lourenço, Taquari, Manso, Alto Paraguai e Jauru. A pesquisa destaca a necessidade de estratégias integradas de gestão e conservação, considerando o uso do solo, o tipo de solo e a declividade, para mitigar a erosão e garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Sedimentologia. Modelagem hidrossedimentológica. SWAT model.

ABSTRACT: The study of sediment dynamics in river basins is crucial to understanding erosion processes and its environmental implications. This paper focuses on the analysis and identification of patterns in sediment production in the Upper Paraguay River Basin, which drains into the Pantanal. The research aims to understand how spatial variables such as land use, soil type, and slope influence the rate of sediment production. The methodology includes hydrosedimentological modeling of five basins to analyze the behavior of the sediment production rate in relation to spatial variables, data correlation, spatial correlation, and the evaluation of the relative importance of these variables using Artificial Neural Networks (ANN). The results indicate that agriculture is the greatest influencer on sediment production, followed by pasture, and then natural vegetation. Sediment production tends to increase with slope, although in a non-linear manner. Soils such as Neossolo, Argisol and Latosol are shown to be more susceptible to erosion. Spatial analysis reveals significant dependence between sub-basins, with the highest production rates observed in the São Lourenço, Taquari, Manso, Alto Paraguai, and Jauru basins. The research highlights the need for integrated management and conservation strategies – considering land use, soil type, and slope to mitigate erosion and ensure the sustainability of water resources.

Keywords: Sedimentology. Hydrosedimentological modeling. SWAT Model.

RESUMEN: El estudio de la dinámica de sedimentos en las cuencas hidrográficas es crucial para comprender los procesos de erosión y sus implicaciones ambientales. Este artículo se centra en el análisis e identificación de patrones en la producción de sedimentos en la cuenca del Alto Paraguay, que desemboca en el Pantanal. La investigación tiene como objetivo comprender cómo las variables espaciales, como el uso del suelo, el tipo de suelo y la pendiente, influyen en la tasa de producción de sedimentos. La metodología incluyó el modelamiento hidrosedimentológico de cinco cuencas para analizar el comportamiento de la tasa de producción de sedimentos en relación a variables espaciales,

correlación de datos, correlación espacial y la evaluación de la importancia relativa de estas variables utilizando Redes Neuronales Artificiales (RNA). Los resultados indicaron que la agricultura es el mayor influenciador en la producción de sedimentos, seguida por los pastos y la vegetación natural. La producción de sedimentos tiende a aumentar con la pendiente, aunque de manera no lineal. Se demostró que suelos como Neosol, Argisol y Latosol son más susceptibles a la erosión. El análisis espacial reveló una dependencia significativa entre las subcuencas, observándose las mayores tasas de producción en las cuencas de São Lourenço, Taquari, Manso, Alto Paraguai y Jauru. La investigación destaca la necesidad de estrategias integradas de gestión y conservación, considerando el uso de la tierra, el tipo de suelo y la pendiente, para mitigar la erosión y asegurar la sostenibilidad de los recursos hídricos.

Palabras clave: Sedimentología. Modelado hidrosedimentológico. Modelo SWAT.

INTRODUÇÃO

A Bacia do Alto Paraguai (BAP), essencial para a gestão hídrica e preservação dos ecossistemas do Pantanal, enfrenta sérios desafios devido às mudanças no uso e ocupação da terra. Atividades humanas, como agricultura intensiva e expansão urbana têm causado perda de biodiversidade, degradação do solo e alterações no ciclo hidrológico, resultando em impactos significativos na qualidade da água e na vida aquática. Embora os reservatórios desempenhem papéis importantes no armazenamento de água, controle de cheias e geração de energia, eles também impõem desafios ambientais, como alterações nos fluxos naturais e no transporte de sedimentos. Nesse contexto, a modelagem hidrossedimentológica emerge como uma ferramenta indispensável para compreender e mitigar esses impactos, promovendo a sustentabilidade ambiental e o bem-estar das populações locais.

O Pantanal, reconhecido como uma das maiores zonas úmidas do mundo, tem sido severamente impactado por mudanças intensas no uso e ocupação da terra, principalmente nas terras altas da Bacia do Alto Paraguai. Essas áreas são drenadas para a planície Pantaneira, onde, durante o período chuvoso, o bioma atua como um grande reservatório, liberando água gradualmente para as partes mais baixas do rio Paraguai. Esse processo torna os fenômenos de erosão hídrica dependentes das condições hidrológicas e climáticas, com repercussões sobre a ecologia local e a dinâmica socioeconômica da região (Marengo; Oliveira; Alves, 2016).

Atividades humanas, como agricultura intensiva, instalação de indústrias e construção de usinas hidrelétricas, aceleram a erosão do solo e aumentam o transporte de sedimentos, matéria orgânica e partículas finas, como silte e argila. A falta de planejamento adequado no uso da terra ameaça não apenas a segurança hídrica, alimentar e energética na BAP, mas também o Pantanal, devido à transferência de sedimentos e à perda da camada superficial fértil do solo. Tais transformações geram implicações significativas para a preservação dos serviços ecossistêmicos na região (Colman *et al.*, 2019).

Mudanças climáticas e alterações no uso e cobertura da terra impactam a disponibilidade hídrica em bacias hidrográficas ao redor do mundo, como observados em regiões semiáridas da Índia (Prado; Tarso; Oliveira, 2022) e na bacia do Alto Nilo Azul, na Etiópia, onde essas mudanças contribuem para o aumento da perda de solo (Anley; Minale, 2024). Estudos sobre o uso predominante de pastagens em sub-bacias indicam aumento no escoamento superficial e na produção de sedimentos, enquanto áreas florestadas tendem a apresentar vazões mais estáveis ao longo do tempo (Afonso de Oliveira Serrão *et*

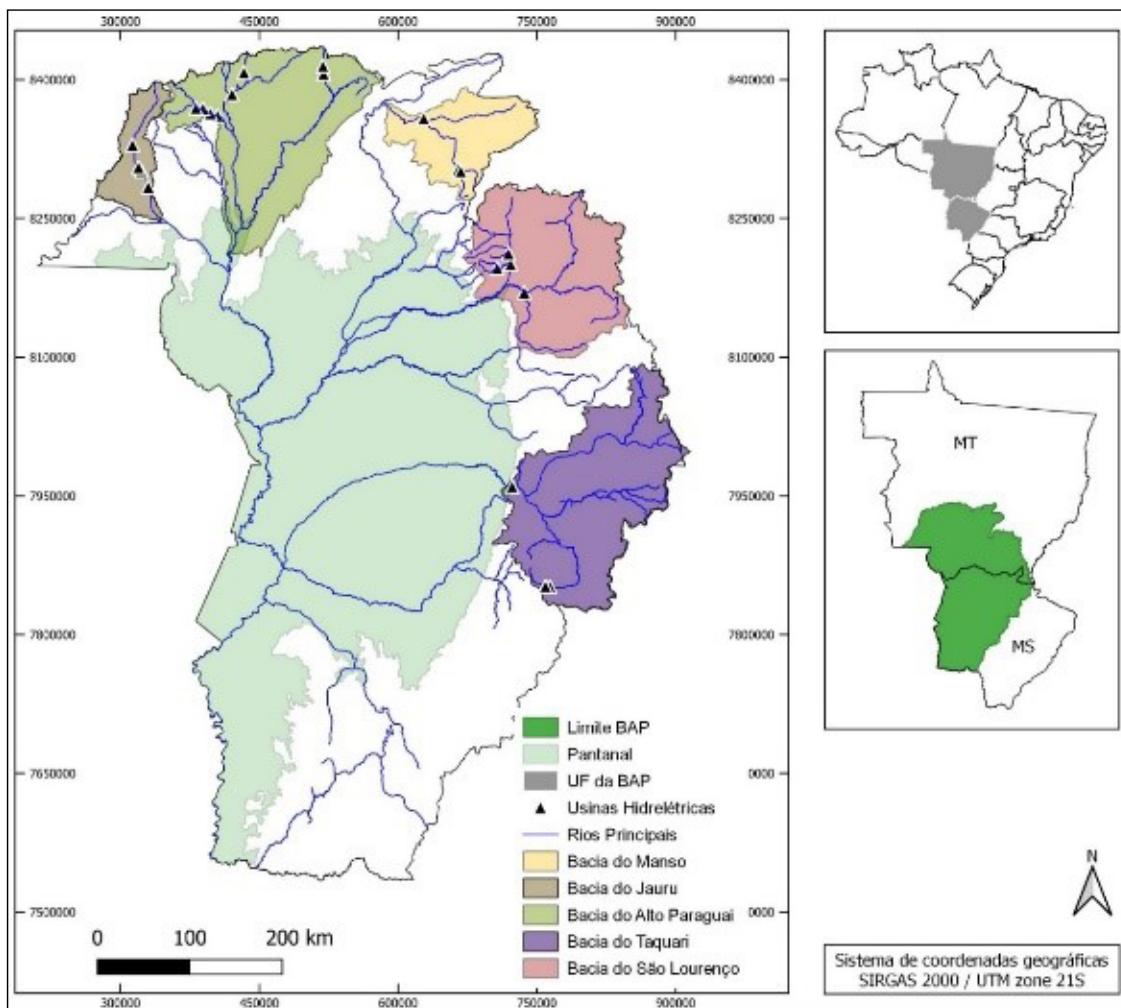
al., 2022). No Delta do Rio Amarelo, na China, iniciativas de conservação ecológica reduziram o fluxo de sedimentos, evidenciando a relação entre uso da terra e dinâmica sedimentológica (Gao *et al.*, 2018).

A gestão eficaz do uso e ocupação da terra é crucial para a preservação dos recursos hídricos e mitigação dos impactos ambientais. A interação entre diversos elementos da paisagem e a dinâmica de produção de sedimentos exige uma abordagem integrada de modelagem hidrossedimentológica, que permite prever as consequências das atividades humanas no ambiente aquático. Dessa forma, a modelagem hidrossedimentológica torna-se uma ferramenta-chave para avaliar os efeitos das mudanças no uso da terra nas características hidrológicas e sedimentológicas dos reservatórios, promovendo uma gestão mais eficiente e sustentável desses recursos naturais (Acharya; Hori; Karki, 2023).

O objetivo central deste estudo é analisar a dinâmica de sedimentos na Bacia do Alto Paraguai, utilizando modelagem hidrossedimentológica para estimar as taxas de produção de sedimento e investigar a relação entre essas taxas e variáveis espaciais, como o uso e ocupação da terra, tipos de solo e declividade. Utilizando-se da modelagem hidrossedimentológica, o estudo busca compreender como essas variáveis influenciam a produção de sedimentos e como elas se correlacionam tanto de maneira estatística quanto espacial. Além disso, o estudo pretende identificar a importância relativa dessas variáveis na dinâmica de sedimentos da bacia, contribuindo para uma gestão hídrica mais eficiente e a mitigação de impactos ambientais. Embora a modelagem e a análise da dinâmica de sedimentos tenham avançado, há lacunas significativas, especialmente devido à ausência de modelos hidrossedimentológicos específicos para a região do Pantanal. Com isso, a interação entre as variáveis espaciais e sua influência no escoamento superficial e na erosão do solo ainda não é totalmente compreendida, limitando a aplicação de modelos para prever cenários futuros com maior precisão.

MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo representa a região hidrográfica do Alto Paraguai, a qual é drenada para o Pantanal brasileiro (Figura 1). Dentro da região, foram delimitadas cinco bacias para modelagem hidrossedimentológica cujo exutório representa uma estação de monitoramento de sedimentos.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 1. Área de estudo.

As delimitações das bacias hidrográficas foram estabelecidas com o intuito de facilitar a modelagem, dado que os processos envolvidos podem ser complexos e demorados, especialmente em regiões de grande extensão. Além disso, essa delimitação possibilitou a realização de análises comparativas mais detalhadas entre as características das diferentes áreas. Paralelamente, as delimitações também foram definidas com base na localização de estações de medição de vazão e de sedimentos, que possuem séries históricas relevantes.

Modelagem Hidrossedimentológica

O processo de modelagem hidrológica e de sedimentos foi realizado em três etapas principais. A primeira envolveu a preparação do ambiente, com a inclusão de mapas de uso da terra, solos e modelo digital do terreno, que permitiram delimitar as sub-bacias e as Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs). A segunda etapa consistiu na entrada de dados climáticos e registros de estações pluviométricas e fluviométricas, utilizando o software QGis e o plugin QSWAT. A terceira etapa focou na calibração e verificação dos parâmetros do modelo SWAT.

A calibração do modelo foi feita em duas fases: uma automatizada, onde parâmetros foram ajustados aleatoriamente dentro de limites, e outra manual, para refinar os ajustes. A validação do modelo envolveu a comparação dos dados simulados com os observados, utilizando três métricas: o Coeficiente de Eficiência Kling-Gupta (KGE), o Percentual de Tendência (pBias) e o coeficiente de correlação de Pearson.

Para a execução do modelo SWAT foram utilizados como entrada o Modelo Digital de Elevação (Figura 1 (MS) - Material suplementar), o uso e ocupação do solo (Figura 2 - MS) e os tipos de solo (Figura 3 - MS). Com esses dados, o software gera as sub-bacias e as HRUs, que são as unidades fundamentais de simulação no modelo SWAT, representando áreas homogêneas dentro da bacia hidrográfica em termos de solo, uso e ocupação da terra e declividade. As classes de uso e ocupação da terra apresentadas na Figura 2 (MS) seguem os padrões do MAPBIOMAS (Mapbiomas, 2018).

As séries históricas de precipitação, vazão e concentração de sedimentos foram obtidas pelo sistema Hidroweb da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). As bases de dados climatológicos de temperatura, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento foram obtidos do Centro Nacional de Previsão Ambiental (NCEP) e pela Reanálise do Sistema de Previsão do Clima (CFSR) dos Estados Unidos, que abrange uma série de 36 anos (1979 a 2014). O CFSR é um sistema global de alta resolução que integra atmosfera, superfície terrestre e gelo marítimo para fornecer a melhor estimativa do estado desses componentes. Os pontos de coleta dos dados CFSR (CFSR, 2021) têm uma resolução espacial de 0,3° entre latitudes e longitudes. A Figura 4 (MS) representa a distribuição dos pontos das estações de vazão, sedimento e precipitação.

A série histórica dos dados de vazão é monitorada diariamente, diferentemente dos dados de sedimento, cuja coleta ocorre, em média, três vezes ao ano. Por essa razão, foi necessário preencher os demais dias por meio de interpolação, utilizando a correlação entre vazão e sedimento observados. Para isso, aplicou-se um método de regressão, que pode ser exponencial ou linear, de acordo com o melhor ajuste obtido. A regressão exponencial aplicada aos dados de sedimento para interpolação está ilustrada na Figura 6 (MS), juntamente com os gráficos de correlação, valores de R^2 e a equação da reta.

Comportamento da taxa de produção de sedimento com variáveis espaciais

A metodologia utiliza o modelo SWAT para cálculos hidrossedimentológicos nas Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs), combinando uso e ocupação da terra, tipo de solo e declividade. Entre os resultados do modelo, destaca-se a taxa de produção de sedimento, essencial para as análises deste estudo. Para processar esses dados, foi realizado um tratamento no software R, onde os dados foram importados, filtrados e organizados em uma tabela contendo HRU, combinação de classes e taxa de produção de sedimentos média para cada combinação.

Correlação de dados

Para as análises de correlação entre as classes das variáveis espaciais foi criada uma tabela em formato dummy, necessária para converter os dados categóricos dessas variáveis. Cada registro com as taxas de produção de sedimento refere-se a uma HRU. Para identificar a contribuição de cada classe à taxa de produção de sedimento foi realizada uma primeira correlação, agrupando as

classes das variáveis espaciais. Essa análise considerou uma reclassificação do uso e ocupação da terra obtidos no Mapbiomas, sendo:

- Vegetação natural: Inclui formação natural, formação florestal, formação savânica e formação campestre;
- Agricultura: Abrange pastagem, agricultura e cultivo de cana-de-açúcar;
- Áreas não vegetadas: Compreende áreas urbanas, outras áreas desprovidas de vegetação, afloramentos rochosos e áreas de mineração.

A tabela original com as taxas de sedimento apresenta as colunas: HRU, uso da terra e taxa de produção de sedimento.

Correlação espacial

O índice de autocorrelação espacial quantifica o grau de correlação espacial de uma variável em um espaço geográfico, avaliando se sua distribuição é aleatória ou apresenta um padrão de agrupamento ou dispersão (Anselin, 1995). Esse índice pode indicar autocorrelação positiva (valores semelhantes próximos entre si) ou negativa (valores dissimilares próximos). Para calcular a autocorrelação espacial, foi aplicado o índice de Moran univariado, utilizando o software GeoDA (Anselin, 2005).

Importância relativa das variáveis espaciais

Foi aplicado os modelos de Redes Neurais Artificiais (RNA) para identificar a importância relativa das variáveis (ocupação da terra, tipo de solo e declividade) em relação a taxa de produção de sedimento. No modelo de RNA, utilizou o uso e ocupação da terra, tipo de solo e declividade como variáveis explicativas, e a taxa de produção de sedimento como variável resposta. A implementação foi realizada no software R, utilizando a biblioteca H2O e a função *h2o.deeplearning*, variando as camadas de neurônios e o número de épocas para otimizar a precisão da RNA. Cada época corresponde a um ciclo de ajuste interno do modelo para prever a taxa de produção de sedimento.

Para avaliar a performance e importância das variáveis, aplicou-se a função *h2o.performance*, que retornou o erro quadrático médio e as importâncias relativas das variáveis, com um valor de referência de 5%. O modelo foi executado em uma rotina de 50 repetições para identificar o melhor desempenho, com seleção final dos três melhores modelos, conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1. Configuração do modelo de RNA para classes das variáveis espaciais

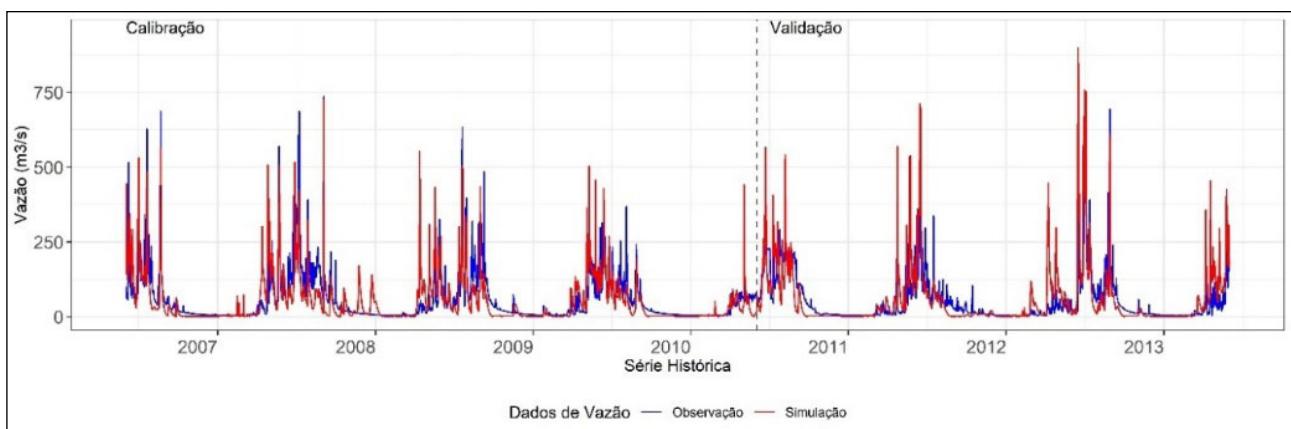
Configuração do modelo	Uso da terra	Solo	Declividade
Camadas de neurônios	3	3	3
Nº de neurônios por camada	4, 8 e 12	7, 14 e 21	5, 10 e 15
Nº de ciclos para cada modelo	30.000	30.000	30.000
Nº de modelos executados	50	50	50

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Modelagem hidrossedimentológica

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 5 e 6). Os hidrogramas e sedimentogramas gerados a partir das simulações (Figuras 5 e 7 - material suplementar) representam o comportamento dos dados das bacias. Nas Figuras 2 e 3, a representação da bacia do rio Manso para vazão e sedimento respectivamente.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 2. Simulação da vazão na bacia do rio Manso.

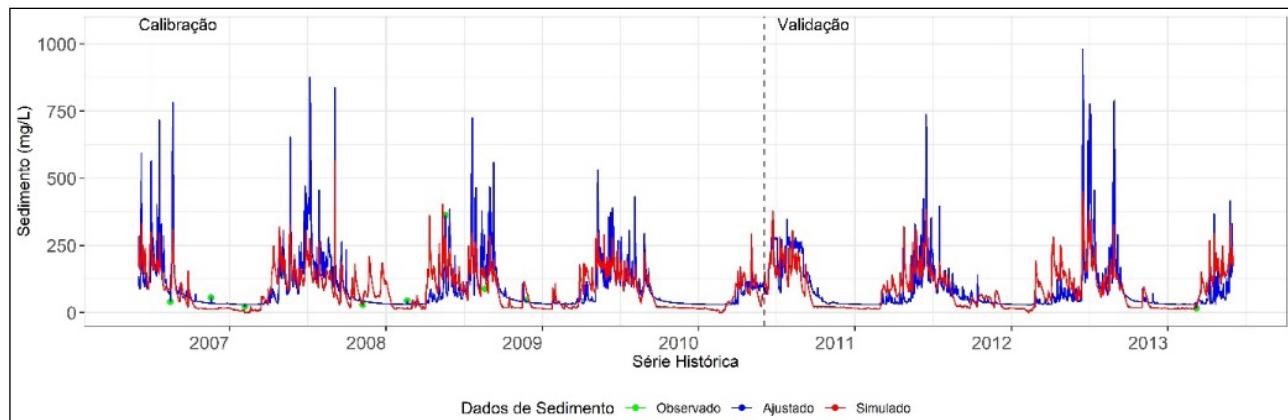
As vazões da bacia do rio Jauru apresentaram uma oscilação forte do início da simulação até o ano de 2003 e depois fica suavizado, especialmente para os valores de máximos. Esse comportamento está relacionado com o início de operação dos reservatórios. As vazões na bacia do Alto Paraguai apresentaram 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 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. 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 KGE variando entre 0,51 e 0,69 durante os períodos de calibração e de validação (Tabela 2).

Tabela 2. Resultados das simulações da vazão.

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

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Observa-se 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 são similares aos modelos calibrados pelo modelo MGB (IPH, 2021) e apresentados no projeto de implementação de práticas de gerenciamento integrado de bacias hidrográficas para o Pantanal (G. Allasia *et al.*, 2015).



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 3. Simulação de sedimento na Bacia do rio Manso.

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 aspecto que chama a atenção dessa bacia, são os valores simulados nos períodos de estiagem, os quais estão sempre abaixo dos valores ajustados.

Há semelhança com a bacia do rio Jauru, onde 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. 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 (Figura 6 – material complementar). 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 3 são apresentados os resultados da performance dos modelos através de índices aplicados.

Tabela 3. Resultados das simulações de sedimentos.

Bacia	Calibração				Validação				KGE entre dados observados e simulados
	Período	KGE	pBias	Pearson	Período	KGE	pBias	Pearson	
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	0,71
Manso	2007-2010	0,59	-0,06	0,65	2011-2013	0,58	-0,12	0,62	0,82
São Lourenço	2006-2009	0,40	-0,04	0,64	2010-2012	0,39	-0,11	0,61	0,47
Taquari	2004-2007	0,58	-0,10	0,62	2008-2010	0,54	-0,12	0,60	0,42

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

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 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 adequada do modelo em reproduzir as variações observadas. No entanto, durante os períodos de validação, a eficiência do modelo diminui ligeiramente, variando entre 0,39 e 0,59, o que sugere 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 tendência de subestimação nas estimativas de sedimento. Quanto ao coeficiente de correlação de Pearson, os valores oscilaram entre 0,61 e 0,70, indicando 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 bom ajuste.

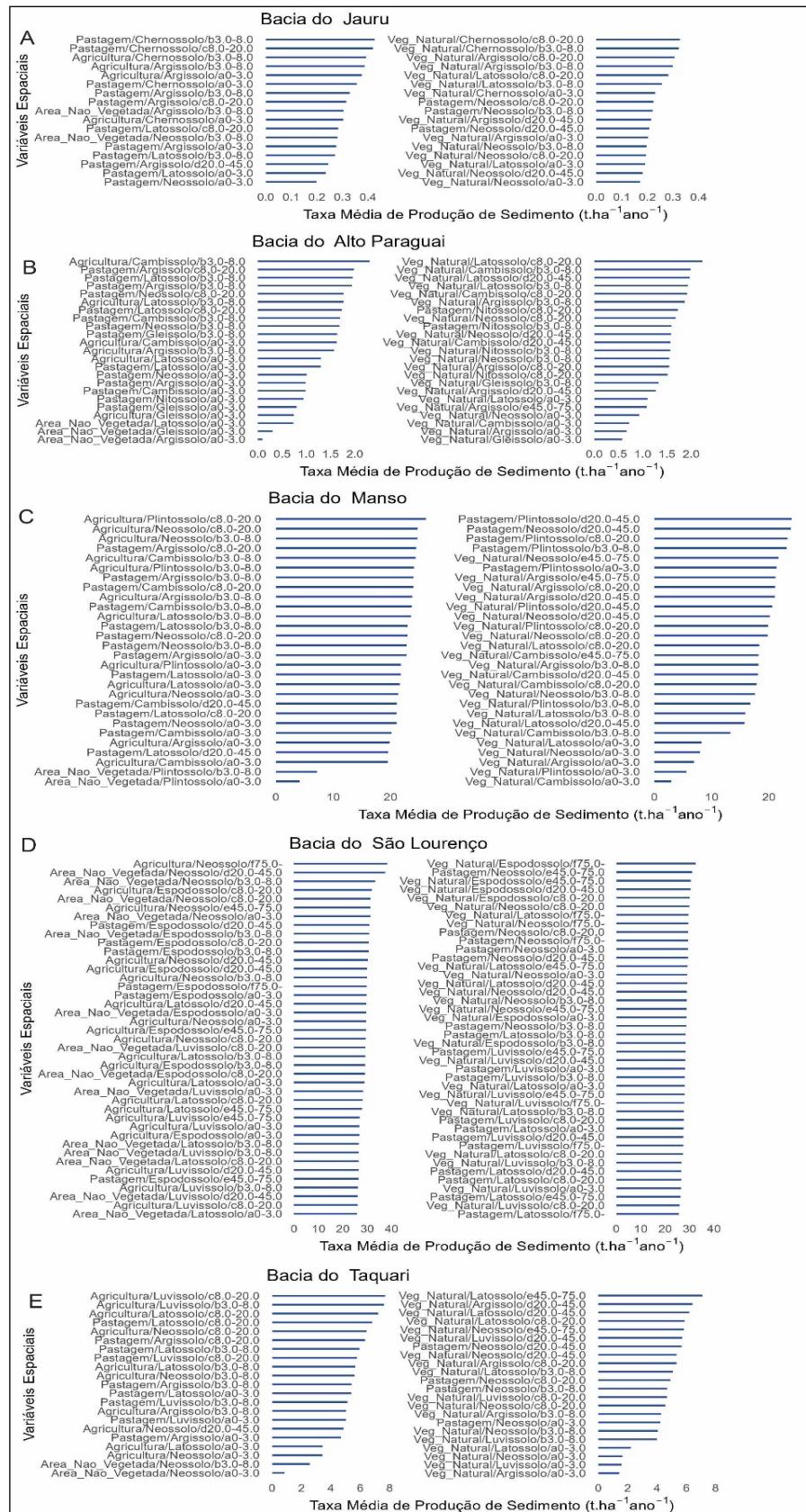
Os valores apresentados na última coluna da Tabela 5 demonstram esse desempenho, onde pode-se observar também que somente na bacia do Taquari o desempenho da série de dados observados foi inferior ao da série ajustada.

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 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.

Comportamento da taxa de produção de sedimento com variáveis espaciais

Nesta seção é analisado o comportamento da taxa de produção de sedimentos em relação às variáveis espaciais agrupadas. Ao agrupar as variáveis, buscou-se compreender as tendências e relações entre os fatores que influenciam a erosão e o transporte de sedimentos nas bacias hidrográficas, destacando como as características das HRUs afetam essa dinâmica.

Considerando que cada bacia possui uma configuração distinta para a estrutura das variáveis espaciais, foram identificadas 34, 46, 56, 81 e 43 combinações para as bacias do rio Jauru, Alto Paraguai, Manso, São Lourenço e Taquari respectivamente e apresentadas na Figura 4.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 4. Taxa média de produção de sedimento agrupadas por HRUs.

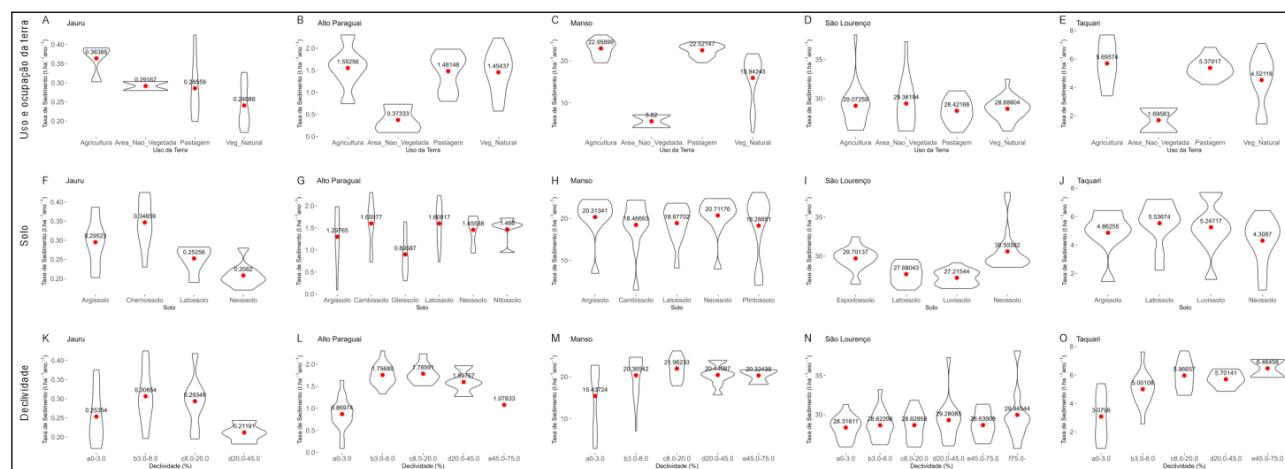
A análise isolada da declividade sugere que a taxa de produção de sedimentos aumenta com seu incremento. Um experimento confirmou essa relação direta e positiva (Wang *et al.*, 2023). De modo semelhante, espera-se que a agricultura tenha grande influência na produção de sedimentos, pois o manejo e a exposição do solo tornam o ambiente mais suscetível a desagregação e ao transporte de sedimentos (Yan *et al.*, 2013; Didoné *et al.*, 2000).

A Bacia do rio Manso e do Rio Taquari mostram uma relação clara entre o aumento da declividade e a produção de sedimentos. No Manso, essa relação é especialmente evidente em solos como Argissolo e Neossolo, enquanto no Taquari, a agricultura lidera as taxas de produção de sedimentos, com a vegetação natural superando a pastagem em declividades acima de 75%. Em ambas, a agricultura é um fator dominante na produção de sedimentos.

A relação entre declividade e produção de sedimentos nas Bacia do Alto rio Paraguai e rio São Lourenço não é tão consistente. No Alto Rio Paraguai, algumas combinações de solo e uso da terra, como pastagem e vegetação natural sobre Latossolo e Nitossolo, não seguem a tendência esperada. No São Lourenço, a variação nas taxas de produção de sedimentos é baixa, e a declividade não aumenta consistentemente a produção, independentemente do uso da terra ou tipo de solo.

Em todas as bacias, a agricultura se destaca como a maior influenciadora na produção de sedimentos, seguida por pastagem e vegetação natural. A análise integrada das bacias revela que, apesar das variações regionais, a declividade e o tipo de solo são fatores críticos na determinação das taxas de produção de sedimentos. A agricultura, mesmo em áreas menores, exerce uma influência significativa, reforçando a necessidade de práticas de manejo sustentável para mitigar a erosão e proteger os recursos hídricos.

Distribuição das taxas de sedimento em função das variáveis espaciais



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 5. Distribuição da taxa de produção de sedimento por uso e ocupação da terra, solo e declividade.

Foram avaliadas as distribuições estatísticas (Figura 5) utilizando a média mensal da taxa de produção de sedimento para cada variável espacial. Os gráficos destacam a densidade dos dados, sendo uma característica especial da representação sob a forma de violino o qual traz uma informação extra para a análise dos resultados.

A agricultura, conforme mostrado na Figura 5 (A até E), apresenta as maiores taxas de sedimento, especialmente nas áreas de maior declividade. Nas áreas não vegetadas, apenas a bacia do rio São

Lourenço mostrou possíveis outliers, enquanto as demais bacias exibiram dados semelhantes. A bacia do Alto Paraguai mostrou uma distribuição regular entre agricultura, pastagem e vegetação nativa, com uma leve tendência decrescente. No entanto, os usos da terra não explicam claramente as influências na taxa de produção de sedimento, com médias e padrões de densidade similares. Comparando a agricultura com a vegetação natural, as bacias do Jauru, Manso e Taquari apresentaram taxas de produção de sedimento 33%, 30% e 21% menores, respectivamente. No Alto Paraguai e São Lourenço, as diferenças foram de apenas 6% e 1%. Em relação à pastagem, apenas a bacia do Jauru mostrou uma diferença significativa de 21%, enquanto as outras variaram entre 1,9% e 5,5%. Em todas as bacias, a agricultura e a pastagem mantêm taxas e concentrações elevadas em uma faixa restrita de valores.

Na análise das distribuições das taxas de produção de sedimento por tipo de solo, conforme apresentado na Figura 5 (F a J), foram observadas poucas semelhanças entre as bacias. O Latossolo, presente em todas as bacias, mostrou uma característica comum nas bacias Jauru e São Lourenço, com uma faixa de concentração de taxa mais estreita, indicando baixa amplitude. Em contraste, outras bacias com Latossolo exibiram maior amplitude nas taxas. A bacia do Alto Paraguai destacou-se por uma distribuição regular das taxas para todos os tipos de solo, com exceção do Gleissolo, que apresentou um valor de $0,89 \text{ ton.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, significativamente abaixo da média de $1,38 \text{ ton.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. O Neossolo, apesar de ser mais suscetível, apresentou média próxima ao Latossolo, que é menos suscetível, e mostrou comportamento similar entre as bacias, exceto no Alto Paraguai, com dados concentrados em uma faixa de amplitude pequena.

A bacia do Manso apresentou uma distribuição atípica, com outliers em todos os tipos de solo, todos na extremidade inferior dos dados. Essa regularidade é evidenciada pela faixa de desvio padrão entre os solos, variando de 4,53 a $7,61 \text{ ton.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. A bacia do rio São Lourenço destacou-se pelo equilíbrio, com a maior densidade de dados em uma faixa de amplitude pequena, embora o Neossolo tenha alguns valores além desse limite superior, possivelmente outliers. Considerando a suscetibilidade dos solos à erosão, observa-se que os tipos de solo mais vulneráveis, como Cambissolo, Neossolo, Plintossolo e Gleissolo, demonstraram densidades mais elevadas em torno da média. Essa característica reflete diretamente sua maior propensão à erosão, indicando que essas formações de solo são mais sensíveis aos processos erosivos.

Em resumo, a análise das taxas de produção de sedimento por tipo de solo revela variações significativas entre as bacias, com algumas mostrando regularidade e outras apresentando outliers que afetam as médias. A susceptibilidade do solo à erosão é um fator crucial, com solos mais suscetíveis exibindo maiores densidades de dados em torno da média, indicando uma tendência de maior taxa de produção de sedimentos. Essa informação é vital para a gestão e planejamento do uso do solo, especialmente em áreas suscetíveis à erosão.

Os dados de declividade são frequentemente analisados em relação ao aumento percentual, pois espera-se uma correlação linear positiva com a taxa de produção de sedimento. No entanto, a complexidade do ambiente pode fazer com que outras variáveis influenciem essa relação. Em geral, observa-se um aumento na taxa de produção de sedimento com o aumento da declividade, mas há exceções notáveis (Figura 5 – K a O). Na bacia do rio Jauru, há leve aumento na taxa com o aumento da declividade, mas a faixa de 8 a 45% apresenta um comportamento atípico. Situação semelhante ocorre nas bacias do Alto Paraguai e Manso, onde a última faixa de declividade, acima de 20%, também exibe um comportamento irregular.

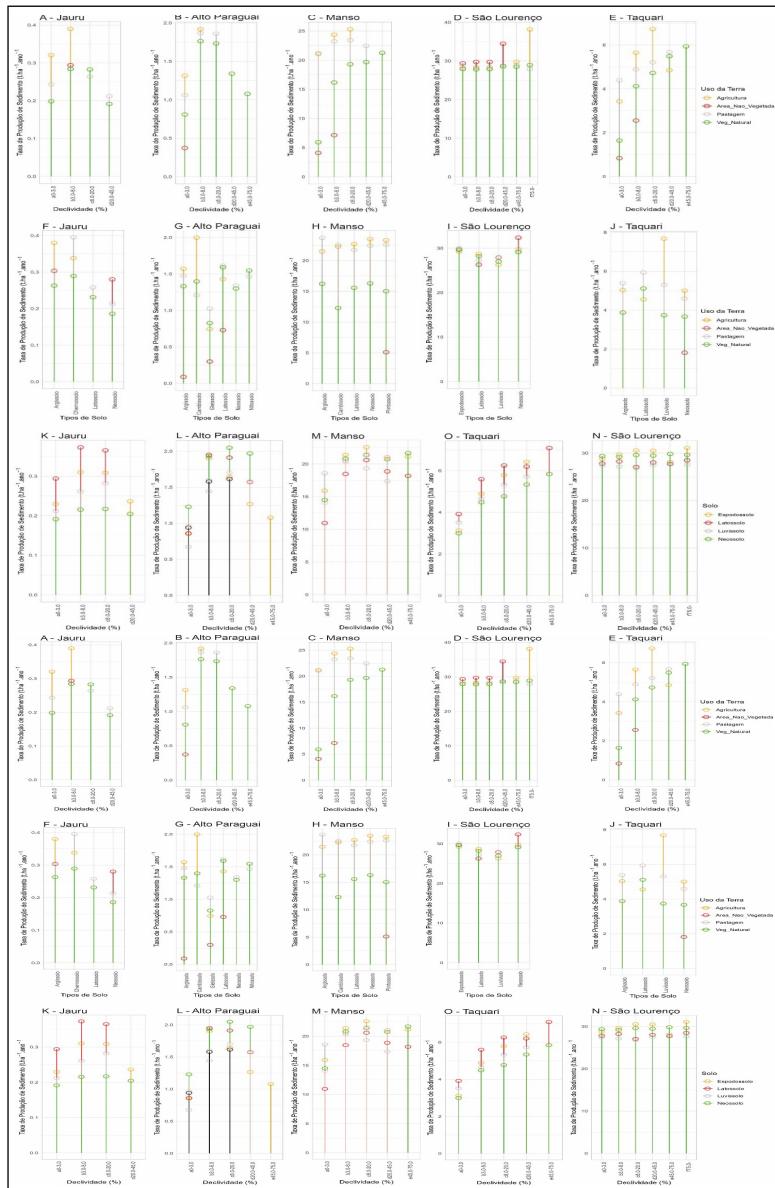
A bacia do rio São Lourenço, por outro lado, não segue a hipótese de que o aumento da declividade resulta em maior produção de sedimento. O desvio padrão de apenas 2,21% indica baixa dispersão dos dados entre os tipos de solo nesta bacia, sugerindo uma regularidade que contraria a tendência esperada. Já a bacia do rio Taquari é a única onde a taxa de produção de sedimento aumenta consistentemente com a declividade, embora haja uma pequena redução de $0,04 \text{ ton.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ entre as faixas de 8 a 20% e 20 a 45%.

Essas observações destacam a importância de considerar múltiplas variáveis ao analisar a relação entre declividade e taxa de produção de sedimento. Embora a tendência geral sugira um aumento na produção de sedimento com a declividade, as variações entre as bacias indicam que fatores locais e específicos do solo podem influenciar significativamente essa relação. Isso ressalta a necessidade de abordagens específicas na gestão de bacias hidrográficas, levando em conta as características únicas de cada região para uma gestão eficaz e sustentável dos recursos naturais.

As análises acima precisam ser interpretadas com muita cautela, pois como já comentado, apenas com essas três variáveis espaciais (uso e ocupação da terra, tipo de solo e declividade), existem diversas combinações e naturalmente, diversas interações. Assim, qualquer inferência para alguma afirmação incisiva, precisa levar essas combinações em consideração. De qualquer forma, a compreensão da distribuição contribuirá para outras análises mais profundadas.

Correlações entre taxa de produção de sedimento e variáveis espaciais

A Figura 6, diferentemente de outras discussões, apresenta um paralelo de duas variáveis espaciais para análises, sendo as combinações de uso e ocupação da terra, tipo de solo e declividade.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 6. Relação entre variáveis espaciais com a taxa de produção de sedimento. (A a E): Uso da terra e declividade – (F a J): Uso e ocupação da terra e solo – (K a O): tipos de solo e declividade

Em todas as bacias analisadas, a agricultura geralmente apresenta a maior taxa de produção de sedimento. No entanto, em algumas combinações específicas, como no solo Chernossolo da bacia do Jauru, no Luvissolo das bacias Alto Paraguai e Taquari, e no Argissolo das bacias do Manso e Taquari, a agricultura tem taxas menores em comparação à pastagem. Notavelmente, na bacia Alto Paraguai, a agricultura mostra uma menor taxa de produção de sedimento em áreas com declividade entre 0 a 3%. Assim, embora a agricultura seja uma das principais contribuintes para a produção de sedimentos, essas variações indicam que fatores locais e específicos do solo podem influenciar significativamente os resultados.

Existem diferenças marcantes nas taxas de produção de sedimento entre áreas agrícolas e áreas de vegetação natural em quase todas as bacias, exceto na bacia do São Lourenço. Isso é corroborado por estudos, como o monitoramento de armadilha de sedimento, onde áreas com pouca cobertura vegetal apresentaram

aumento de 30% no escoamento superficial, facilitando a desagregação e o transporte de sedimentos (Kabora; Stump; Wainwright, 2020). A produção de sedimentos suspensos na bacia hidrográfica aumentou em média 24 a 39 ton km⁻² ano⁻¹ desde a intensificação da agricultura na década de 1950 (Pulley; Collins, 2024). Com o uso do isótopo Cs¹³⁷ como marcador comprovou o aumento do transporte de sedimentos a partir da expansão agrícola nas paisagens úmidas das pradarias canadenses (Zarrinabadi *et al.*, 2023).

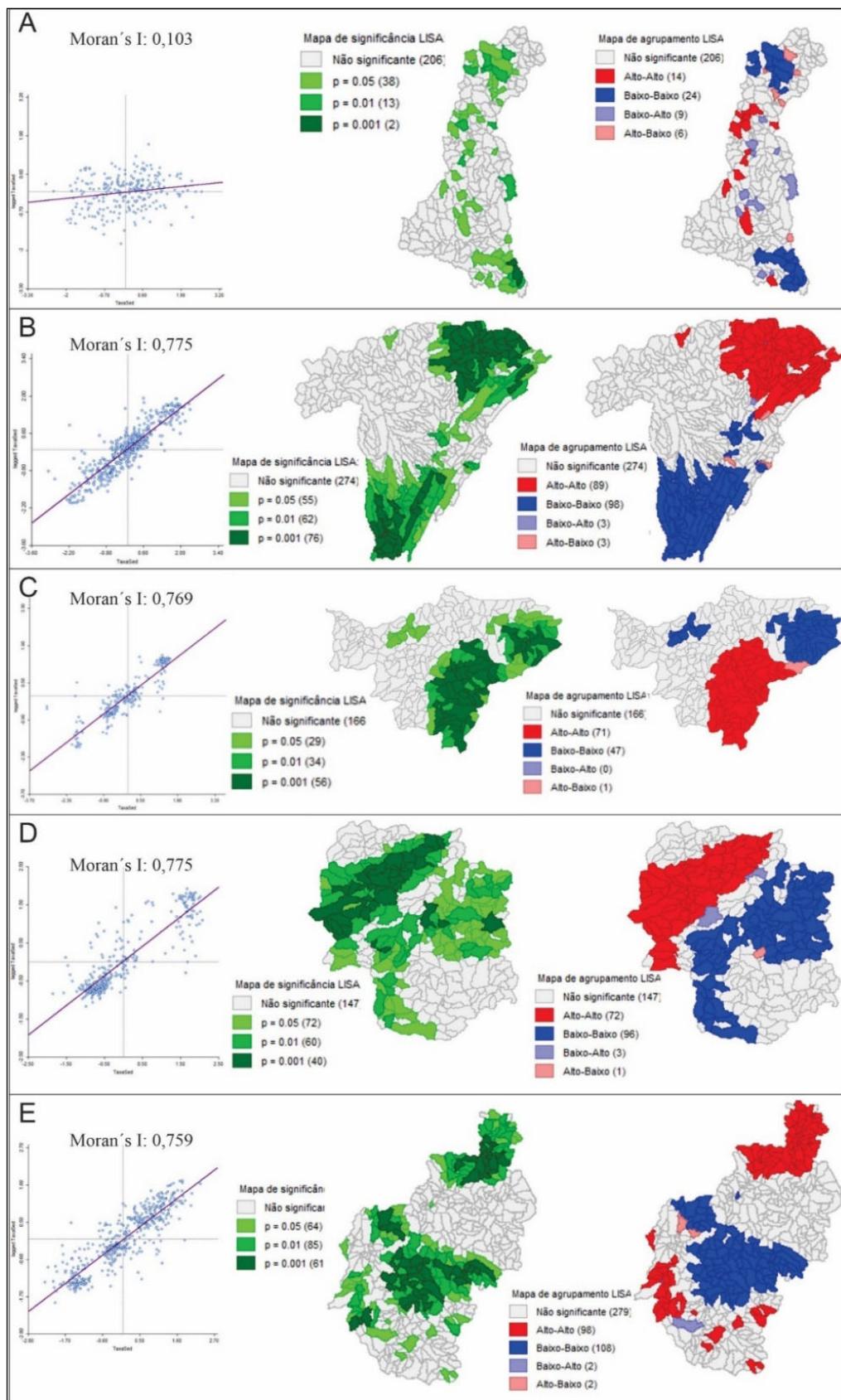
A declividade é uma variável crucial no processo sedimentológico. Quanto maior a declividade, mais rapidamente a energia potencial do escoamento superficial se transforma em energia cinética, resultando em maior velocidade das massas de água e, consequentemente, na sua capacidade de transporte. Esse aumento na capacidade de transporte é responsável pela erosão que esculpe as formas de relevo, predominando assim os processos morfogenéticos (Crepani *et al.*, 2001). Portanto, espera-se que as taxas de produção de sedimento aumentem com o aumento da declividade. No entanto, nem todas as observações nos gráficos seguem essa hipótese.

As taxas de produção de sedimento obtidas neste estudo derivam de uma combinação de variáveis, como uso e ocupação da terra, tipo de solo e a declividade, cujas interações complexas podem influenciar de maneiras diferentes o processo sedimentológico. As bacias do Manso (Figuras 6C e 6H) e Taquari (Figuras 6E e 6J), se alinharam com a hipótese mencionada, tanto em relação ao uso e ocupação da terra quanto aos tipos de solo. Nas demais bacias, houve aumento da taxa com o aumento da declividade para faixas menores que 20%. A declividade também é um fator integrador em alguns índices de conectividade de sedimentos, sendo utilizada como parâmetro ponderador para a probabilidade de ocorrência da conexão desses sedimentos (Zanandrea *et al.*, 2020; Cavalli *et al.*, 2013).

Solos menos susceptíveis à erosão hídrica, como Nitossolo e Latossolo, predominam com taxas mais baixas de produção de sedimento, especialmente quando combinados com determinados usos da terra, como observado nas bacias do Jauru (Figura 6F), Alto Paraguai (Figura 6G) e São Lourenço (Figura 6I), sendo o Nitossolo presente apenas na bacia do Alto Paraguai (Figura 6G). Em contrapartida, o Neossolo, conhecido por sua alta suscetibilidade à erosão hídrica, apresenta as maiores taxas de sedimento na bacia do São Lourenço, independentemente do tipo de uso da terra (Figura 6I). No entanto, quando avaliado em relação à declividade, suas taxas são menores do que as do Espodossolo (Figura 6N). De maneira geral, os solos não refletiram comportamento consistente em relação à vulnerabilidade e a taxa de produção de sedimento. Isso indica que a sensibilidade dos solos à erosão está diretamente relacionada às interações complexas com o uso da terra e a declividade. Essas interações tornam difícil estabelecer correlações diretas com análises isoladas.

Correlação espacial com base na taxa de produção de sedimento

A correlação espacial descreve a dependência entre os valores de uma variável em diferentes locais no espaço. Ela mede o grau em que esses valores em uma localização influenciam ou são influenciados pelos valores da mesma variável em localizações vizinhas (Kumari; Sarma; Sharma, 2019). Nesse estudo, as taxas de produção de sedimento de cada subbacia foram analisadas em relação às subbacias vizinhas e suas devidas taxas. A interpretação do mapa de clusters é a partir da observação das cores em sua legenda e associado ao mapa. A representação do termo “Alta” e “Baixa” refere-se aos valores da variável em questão, sendo que o primeiro termo refere à sub bacia de análise e o segundo termo refere-se às sub bacias vizinhas.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 7. Correlação espacial em função da taxa de produção de sedimento

Ao analisar os valores do índice de Moran, todas as bacias exibiram alta correlação espacial (acima de 0,76), exceto a bacia do rio Jauru (Figura 7A), que apresentou apenas 0,103. Apesar dessa baixa correlação geral, algumas sub-bacias ainda mostraram correlação significativa: 14 sub-bacias com altas taxas de sedimento foram influenciadas por vizinhos também com altas taxas, enquanto 24 sub-bacias com baixas taxas foram influenciadas por vizinhos com taxas igualmente baixas. Essas correlações pontuais estão espalhadas por toda a bacia, com dois grupos notáveis ao norte e ao sul.

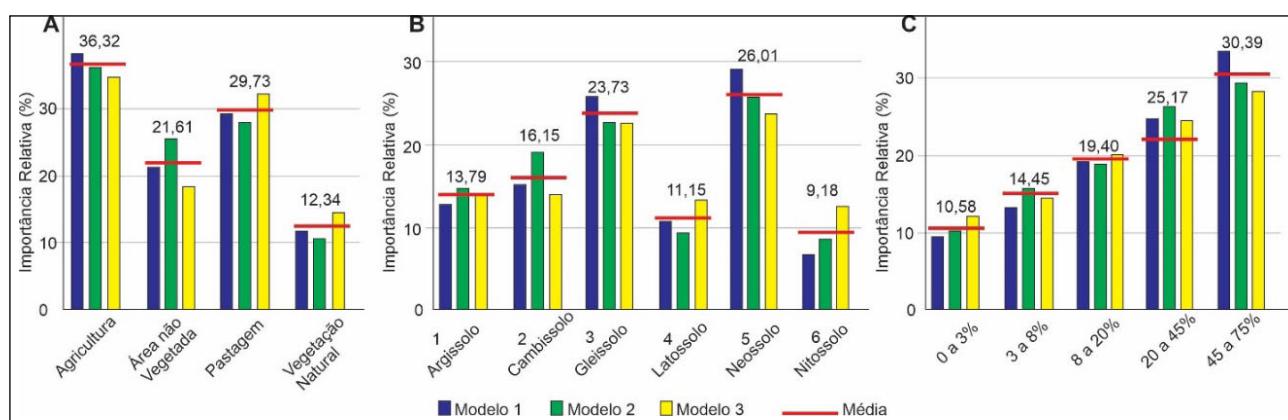
As bacias do Alto Paraguai e do rio Manso (Figuras 7B e 7C) compartilham uma distribuição semelhante de sub-bacias com altas correlações, formando dois grupos destacados e isolados. Aproximadamente 40% das sub-bacias nessas regiões apresentam autocorrelação espacial significativa. Além disso, as correlações com nível de significância de 0,1% superam aquelas com níveis de 1% e 5%, reforçando a robustez do índice.

Na bacia do rio São Lourenço (Figura 7D), as correlações de altas taxas de sedimento formaram uma única região, cobrindo 22,5% da bacia. Em contraste, as correlações de baixas taxas formaram três agrupamentos, representando 30% da área. Assim, 52,5% da bacia apresenta correlações significativas em relação à produção de sedimentos.

Por fim, entre as quatro bacias com altas correlações espaciais, a bacia do Taquari (Figura 7E) possui as correlações mais dispersas, especialmente para sub-bacias com altas taxas influenciadas por vizinhos com taxas igualmente altas. Todas as sub-bacias com autocorrelação espacial dispersa apresentam um nível de significância de 5%.

Importância relativa das variáveis espaciais com a taxa de produção de sedimento

Com a execução do modelo de RNA, foram selecionados os 3 com melhores desempenhos e calculado a média.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 8. Importância relativa das variáveis espaciais em função da taxa de produção de sedimento com uso de RNA.

A: Uso e ocupação da terra – B: solo – C: Declividade.

Foi constatado que a agricultura apresentou maior peso na influência da taxa de produção de sedimento, seguido da pastagem, área não vegetada e vegetação natural (Figura 8). Como observado na Figura 2 (material suplementar) e relatado por Kenea *et al.* (2021), terras agrícolas estão mais

suscetíveis a erosão hídrica, especialmente por existirem mais solos expostos e facilitando a desagregação e o transporte de sedimentos. As terras agrícolas registraram aumento ao longo do tempo, enquanto o padrão oposto foi observado no uso da terra por florestas (Ma *et al.*, 2024). Um estudo na região semiárida da Austrália identificou que a pastagem produziu 63% a mais de sedimento em relação a floresta aberta (Muñoz-Robles *et al.*, 2011).

Para realizar uma breve comparação dos resultados da RNA, foi adicionado valores referentes ao grau de susceptibilidade do tipo de solo à erosão hídrica, conforme adaptação de Crepani *et al.* (2001). Esse grau de susceptibilidade varia de 1 a 3, sendo 1 a menor susceptibilidade. Considerando a variação na distribuição dos tipos de solos entre as bacias, optou-se por executar a RNA separadamente para cada bacia (Figura 8B).

Os resultados das RNAs para as diferentes bacias apresentaram comportamentos distintos. No entanto, há boa coerência na ordem de importância dos tipos de solos entre as bacias, baseada na susceptibilidade à erosão hídrica. Embora calcular a média de cada tipo de solo não seja adequado, pois nem todos os solos estão presentes em todas as bacias, muitos apresentaram valores de importância relativa bastante próximos. Por exemplo, Neossolo, Argissolo e Latossolo, presentes em quase todas as bacias, demonstraram coerência com a ordem de susceptibilidade. As exceções a essa coerência foram observadas nas bacias do Alto Paraguai e Taquari, especificamente entre Argissolo e Latossolo.

A declividade acima de 75% não foi considerada devido à falta de representatividade nos dados disponíveis. Conforme a figura 8C, observou-se uma coerência na importância relativa com o aumento da declividade. Essa coerência foi constatada nos três modelos selecionados como mais eficientes e também na média dos resultados. Esses resultados reforçam as inferências apresentadas em seções anteriores, destacando que a taxa de produção de sedimento é fortemente influenciada pela declividade em relação à sua escala percentual.

CONCLUSÕES

A análise de padrões na dinâmica dos sedimentos mostrou que a taxa de produção de sedimentos é influenciada por variáveis espaciais como uso da terra, tipo de solo e declividade. A agricultura apresentou as maiores taxas de produção, seguida por pastagem e vegetação natural. A produção de sedimentos aumentou com a declividade, embora nem sempre de forma linear. Observações isoladas e distribuições revelaram densidade das taxas próximas à média, reforçando essas inferências. A análise espacial com o índice de Moran indicou dependência significativa entre sub-bacias, confirmando a conexão dos sedimentos. Avaliando todas as bacias, as maiores taxas de produção de sedimento foram: São Lourenço, Taquari, Manso, Alto Paraguai e Jauru, refletindo a influência da agricultura, mesmo em áreas pequenas.

A análise das taxas de produção de sedimentos, utilizando Redes Neurais Artificiais (RNA), destacou a importância relativa das classes de variáveis espaciais. Os principais resultados incluem: 1- Uso e ocupação da terra: A agricultura emergiu como a maior influenciadora na produção de sedimentos, seguida por pastagem e áreas não vegetadas, com percentuais de 36,32, 29,73, 21,61 e 12,34%, respectivamente, evidenciando a susceptibilidade das terras agrícolas à erosão hídrica; 2- Tipos de solo: Solos como Neossolo, Argissolo e Latossolo demonstraram vulnerabilidade à erosão, com exceções nas bacias do Alto Paraguai e Taquari; 3- Declividade: Observou-se que a produção

de sedimentos aumentou com a declividade, apresentando sensibilidades que variaram de 13,19 a 28,11% nas diferentes faixas analisadas.

Portanto, é importante implementar estratégias de manejo e conservação integradas, considerando uso da terra, tipo de solo e declividade, para mitigar a erosão e garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos nas bacias estudadas.

REFERÊNCIAS

- ACHARYA, Suchana; HORI, Tomoharu; KARKI, Saroj. Assessing the spatio-temporal impact of landuse landcover change on water yield dynamics of rapidly urbanizing Kathmandu valley watershed of Nepal. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 50, p. 101562, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101562>>.
- AFONSO DE OLIVEIRA SERRÃO, Edivaldo et al. Impacts of land use and land cover changes on hydrological processes and sediment yield determined using the SWAT model. **International Journal of Sediment Research**, v. 37, n. 1, p. 54–69, 2022.
- ANLEY, Melkamu Alebachew; MINALE, Amare Sewnet. 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. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101177>>.
- BALDISSERA, Gisele Cristina. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para bacia hidrográfica do rio Cuiabá-MT**. 2005. Universidade Federal do Mato Grosso - Cuiabá, 2005.
- CAVALLI, Marco et al. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. **Geomorphology**, v. 188, p. 31–41, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.05.007>>.
- COLMAN, Carina B. et al. Effects of Climate and Land-Cover Changes on Soil Erosion in Brazilian Pantanal. **Sustainability** (Switzerland), v. 11, n. 24, 2019.
- CREPANI, Edison et al. **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao Ordenamento Territorial**. Inpe (Inpe-8454-Rpq/722), p. 103, 2001. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/laf/sap/artigos/CrepaneEtAl.pdf>>.
- DIDONÉ, Elizeu Jonas et al. **Monitoramento do impacto da agricultura conservacionista no comportamento hidrossedimentológico em duas grandes bacias rurais**. p. 1–18, 2000.
- G. ALLASIA, Daniel 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.
- GAO, Peng et al. Land degradation changes in the Yellow River Delta and its response to the streamflow-sediment fluxes since 1976. **Land Degradation and Development**, v. 29, n. 9, p. 3212–3220, 2018.
- IPH - Instituto de Pesquisas Hidráulicas. **Hidrologia de Grande Escala**. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/hge/mgb/o-que-e/>>.
- KABORA, T. K.; STUMP, D.; WAINWRIGHT, J. How did that get there? Understanding sediment transport and accumulation rates in agricultural landscapes using the ESTTraP agent-based model. **Journal of Archaeological Science: Reports**, v. 29, n. December 2019, p. 102115, 2020. Disponível

- em: <<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.102115>>.
- KUMARI, Maya; SARMA, Kiranmay; SHARMA, Richa. Using Moran's I and GIS to study the spatial pattern of land surface temperature in relation to land use/cover around a thermal power plant in Singrauli district, Madhya Pradesh, India. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 15, n. February, p. 100239, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.100239>>.
- MA, Tianle et al. Response of soil erosion to vegetation and terrace changes in a small watershed on the Loess Plateau over the past 85 years. **Geoderma**, v. 443, n. March, p. 116837, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116837>>.
- MARENKO, Jose A; OLIVEIRA, Gilvan S; ALVES, Lincoln M. Climate Change Scenarios in the Pantanal BT - Dynamics of the Pantanal Wetland in South America. In: BERGIER, IVAN; ASSINE, MARIO LUIS (Org.). **Cham**: Springer International Publishing, 2016. p. 227–238. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/698_2015_357>.
- MUÑOZ-ROBLES, C. et al. Soil hydrological and erosional responses in areas of woody encroachment, pasture and woodland in semi-arid Australia. **Journal of Arid Environments**, v. 75, n. 10, p. 936–945, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.05.008>>.
- OLIVEIRA, Warlen Librelon De; PINHEIRO, Adilson. Relações entre paisagem e vazão nas bacias do alto rio. XXV Simpósio Brasileiro de recursos hídricos. **Anais[...]**, v. 0, p. 1–10, 2023.
- PRADO, Paula; TARSO, Paulo; OLIVEIRA, S. **Efeitos das mudanças do clima e da cobertura do solo na disponibilidade hídrica em uma bacia do Cerrado brasileiro**. Palavras-chave. p. 1–45, 2022.
- PULLEY, S.; COLLINS, A. L. Soil erosion, sediment sources, connectivity and suspended sediment yields in UK temperate agricultural catchments: Discrepancies and reconciliation of field-based measurements. **Journal of Environmental Management**, v. 351, n. December 2023, p. 119810, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119810>>.
- SHARMA, Alka; PATEL, P. L.; SHARMA, Priyank 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. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106298>>.
- WANG, Tian et al. Establishment of a sediment transport capacity equation on loessal slope via experimental investigation. **International Journal of Sediment Research**, v. 38, n. 2, p. 166–174, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2022.10.001>>.
- YAN, B. et al. Impacts of land use change on watershed streamflow and sediment yield: An assessment using hydrologic modelling and partial least squares regression. **Journal of Hydrology**, v. 484, p. 26–37, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.008>>.
- ZANANDREA, Franciele et al. Conectividade Dos Sedimentos: Conceitos, Princípios E Aplicações. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 2, p. 0–3, 2020.
- ZARRINABADI, Ehsan et al. Agricultural activities lead to sediment infilling of wetlandscapes in the Canadian Prairies: Assessment of soil erosion and sedimentation fluxes. **Geoderma**, v. 436, n. February, p. 116525, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116525>>.