

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

Análise qualitativa sobre o efeito histerese entre vazão, turbidez e sedimentos em suspensão

Rodrigo Biz Willig¹ ; Gean Paulo Michel² & Franciele Zanandrea³

Abstract: This study examined the hysteresis effect between discharge, turbidity, and suspended sediments during rainfall events in the Baio stream watershed, located in São Francisco de Paula, Brazil. Hydrosedimentological monitoring data and simulations using the openLISEM model were employed to assess watershed response. Hysteresis analysis enabled the identification of sediment transport patterns, distinguishing between near and distant sediment sources based on the loop direction in hysteresis curves. Four events from November to December 2023 were analyzed, revealing varying behaviors: clockwise, counterclockwise, and undefined loops. Results show that sediment availability strongly influences hysteresis curves and watershed responses, depending on event magnitude and sequence. Preceding events can increase or decrease available sediments, affecting subsequent turbidity. The study highlights hysteresis curves as a valuable qualitative tool for understanding hydrosedimentological dynamics, while emphasizing the need for complementary modeling and field validation. Reliable and continuous monitoring proves crucial for accurate assessments and effective water resource management.

Resumo: Este estudo investigou o efeito histerese entre vazão, turbidez e sedimentos em suspensão em eventos de precipitação na bacia hidrográfica do arroio Baio, localizada em São Francisco de Paula (RS). Foram utilizados dados de monitoramento hidrossedimentológico e simulações no modelo openLISEM para analisar a resposta da bacia. A análise de histerese permitiu identificar padrões de transporte de sedimentos, distinguindo fontes próximas ou distantes ao canal por meio da orientação dos laços nas curvas de histerese. Foram avaliados quatro eventos entre novembro e dezembro de 2023, observando diferentes comportamentos: laços horários, anti-horários e não definidos. Os resultados indicam que a disponibilidade de sedimentos influencia significativamente a forma das curvas e a resposta da bacia, sendo dependente da magnitude e sequência dos eventos. Eventos anteriores podem aumentar ou reduzir a disponibilidade de sedimentos, influenciando a intensidade de turbidez subsequente. A pesquisa destaca a relevância das curvas de histerese como ferramenta qualitativa na compreensão da dinâmica hidrossedimentológica, mas ressalta a importância de complementá-las com modelagens e validações em campo. A qualidade e continuidade do monitoramento hidrossedimentológico se mostram essenciais para diagnósticos precisos e gestão eficiente dos recursos hídricos.

Palavras-Chave – Produção de sedimento; Monitoramento hidrossedimentológico; Curvas de histerese.

1) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, rbizw96@gmail.com

2) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, gean.michel@ufrgs.br

3) Universidade Federal Fluminense, francielez@id.uff.br

INTRODUÇÃO

A erosão do solo é um problema atual que ameaça a sustentabilidade ambiental e limita a sobrevivência humana, restringindo o desenvolvimento socioeconômico (Han et al., 2016). Nesse contexto, a intensificação dos processos erosivos é considerada um dos principais problemas ambientais emergentes (Silva et al., 2007).

A produção de sedimentos tem sido amplamente utilizada como indicador dos impactos das atividades antrópicas sobre os recursos hídricos, especialmente em bacias hidrográficas (Lacombe et al., 2008). A capacidade de compreender a dinâmica da água e dos sedimentos em uma bacia hidrográfica, bem como sua resposta a diferentes alterações ambientais e de uso do solo, está diretamente relacionada à existência de um monitoramento hidrossedimentológico adequado.

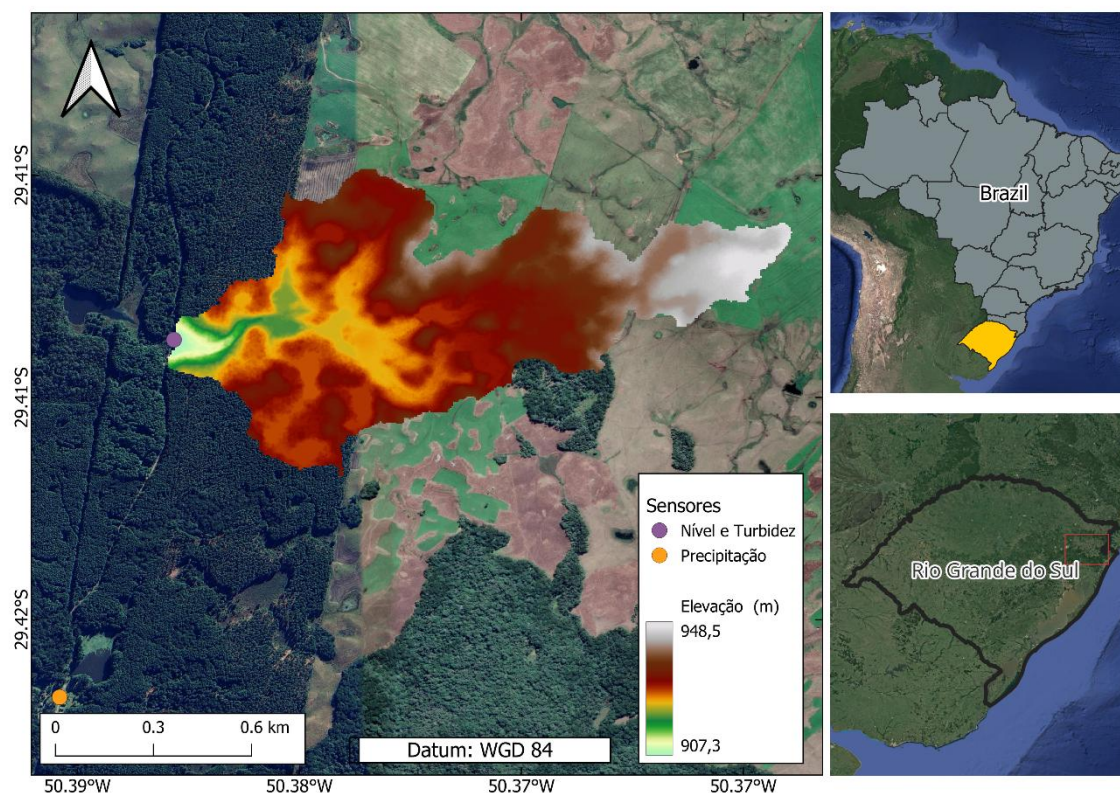
A análise de histerese tem se mostrado uma ferramenta relevante na identificação de fontes de sedimentos e na compreensão dos mecanismos de transporte de água e sedimentos. Por meio de análises qualitativas e quantitativas, a histerese permite inferências sobre a dinâmica dos eventos hidrossedimentológicos. A identificação do sentido do laço nas curvas de histerese é realizada por meio da comparação temporal entre os valores de vazão e concentração de sedimentos em suspensão (Carvalho et al., 2017).

Diante disso, o objetivo principal deste trabalho foi classificar e quantificar os laços de histerese entre a vazão e a concentração de sedimentos em suspensão, durante eventos de precipitação em uma pequena bacia hidrográfica. materiais e métodos

Área de estudo

A área de estudo corresponde à bacia hidrográfica do arroio Baio, situada na região dos Campos de Cima da Serra, no município de São Francisco de Paula, localizado no nordeste do estado do Rio Grande do Sul (RS), Brasil. A bacia hidrográfica (Figura 1) possui aproximadamente 0,89 km² de área de drenagem, com altitude média de 948 metros, variação altimétrica de 41 metros e declividades que variam entre 0° e 32°. A cobertura do solo é predominantemente composta por campos nativos, florestas de Araucária (*Araucaria angustifolia*) em formações isoladas e áreas agrícolas em pequenas propriedades (Dantas et al., 2010). A região é caracterizada por solos com alto teor de matéria orgânica, elevada fração de argila e baixa densidade aparente (Dümig et al., 2008). O solo predominante é classificado como Cambissolo Húmico, com profundidade variando entre 0,5 e 1 metro (GPDEN/SEMA, 2017).

Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do arroio Baio.



O uso do solo e a cobertura vegetal da bacia do arroio Baio são atualmente caracterizados por um mosaico composto por floresta nativa (5%), campos (pastagens) (24%), áreas agrícolas (29%) — com cultivos de soja, batata e milho —, além de formações florestais com Araucárias e uma grande quantidade de espécies exóticas, como *Pinus* sp. e *Eucalyptus* sp. (25%) (Abatti et al., 2021). A região apresenta clima do tipo Cfb, segundo a classificação de Köppen-Geiger, caracterizado como superúmido a úmido, com precipitações elevadas (superiores a 150 mm/mês), bem distribuídas ao longo do ano, totalizando mais de 2000 mm anuais. A temperatura média anual é de 18,5 °C, com mínima absoluta de -3 °C no mês mais frio e máxima absoluta de 27 °C no mês mais quente (Da Silva et al., 2012).

Monitoramento hidrossedimentológico

No presente trabalho, o monitoramento hidrossedimentológico da região fornece os dados que fundamentam as demais análises. As informações obtidas permitem evidenciar a resposta hidrológica e sedimentológica da bacia frente a diferentes eventos de precipitação.

As variáveis monitoradas foram precipitação, vazão e turbidez, na Tabela 1 é apresentada os dados dos sensores utilizados no monitoramento, enquanto a localização dos sensores pode ser observada na Figura 1. Para a medição da precipitação, foi utilizado um pluviômetro automático (modelo SL2010 P), que opera com recipientes basculantes para registrar os volumes de chuva.

A vazão foi determinada com o auxílio de uma sonda multiparâmetro AQUA TROLL 600, a qual mede o nível d'água por meio da pressão (em kPa). Para a conversão da pressão em nível (m), foi instalado um sensor de pressão atmosférica (modelo HOB0) em uma árvore próxima ao exutório da bacia. Com dois sensores posicionados no leito do arroio Baio e um fora dele, a diferença de pressão entre os sensores permite calcular o nível d'água. A conversão do nível em vazão é realizada por meio de uma calha Parshall de concreto, na qual a própria sonda está instalada (Figura 2). A

relação entre o nível medido e a vazão correspondente foi estabelecida por Abatti (2022). Além disso, a mesma sonda também é responsável pela medição da turbidez da água.

Tabela 1 - Dados dos sensores utilizados no monitoramento.

Variável	Sensor	Intervalo de medição
Chuva	SL2010 P - Solar Inst.	5 min
Nível	HOBO - Onset U20L-01 - Water Level	5 min
Turbidez	AQUA TROLL 600 - In-Situ	5 min

Figura 2. A) Calha Pashal utilizada. B) Localização da sonda multiparâmetro AQUA TROLL.



Modelo hidrossedimentológico

Por meio do monitoramento hidrossedimentológico, foram obtidos dados de turbidez. Para viabilizar a comparação desses valores com a produção de sedimentos, foi realizada uma simulação hidrossedimentológica.

A modelagem hidrossedimentológica foi realizada utilizando a versão de código aberto do LISEM (openLISEM v6.848). As informações básicas necessárias para a execução do modelo incluem: modelo digital de elevação (MDE); delimitação da área de drenagem da bacia hidrográfica; localização do exutório; localização das estradas e da rede de drenagem; mapas de uso e manejo do solo para cada evento; mapa de tipos de solo; e uma tabela com os parâmetros físicos do solo, características da superfície e da vegetação. Também é exigido um arquivo com a variabilidade temporal da intensidade de precipitação referente ao evento analisado.

As entradas do modelo são, em sua maioria, fornecidas na forma de mapas, com exceção da intensidade de precipitação, que é inserida por meio de um arquivo de texto. Além disso, o LISEM

depende de mapas fisiográficos básicos que são vinculados às tabelas de atributos, permitindo a geração de novos mapas com os dados exigidos para a simulação. Essas informações podem ser obtidas por medições em campo ou por meio de revisão da literatura especializada.

De forma geral, os processos hidrossedimentológicos simulados pelo modelo incluem: precipitação, interceptação, armazenamento superficial em microdepressões, percolação da água no solo, escoamento superficial, desagregação do solo por impacto direto das gotas de chuva e por gotas interceptadas pela vegetação, destacamento de partículas pelo escoamento superficial e deposição do material transportado (De Roo et al., 1996).

O modelo LISEM é integrado a um Sistema de Informações Geográficas (SIG), o que possibilita a entrada e saída de dados espacializados (Van Deursen & Wesseling, 1992).

Eventos utilizados

Os eventos monitorados no presente trabalho são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados dos eventos monitorados na análise.

Evento	Precipitação acumulada (mm)	Nível máximo (cm)	Vazão de pico (L/s)	Turbidez no pico (NTU)
12/13 nov. 2023	66,2	51,1	212,3	106,7
10 dez. 2023	41,0	16,3	25,1	101,3
15 nov. 2023	28,4	44,8	167,7	111,0
17/20 nov. 2023	142,2	80,2	447,0	96,8

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Avaliação de Tendências

A histerese é uma ferramenta útil para o estudo da complexa interação entre duas variáveis distintas. No presente estudo, a análise de histerese foi aplicada, para os dados observados, à relação entre vazão e turbidez; enquanto que, para os dados simulados, avaliou-se a relação entre vazão e concentração de sedimentos em suspensão. Entre a Figura 3 e a Figura 6 são apresentados os resultados obtidos para a relação de histerese entre as variáveis, tanto com base nos dados observados quanto nos dados simulados.

Figura 3 – Evento 1: curva de histerese para o evento de 12/13 nov. 2023.

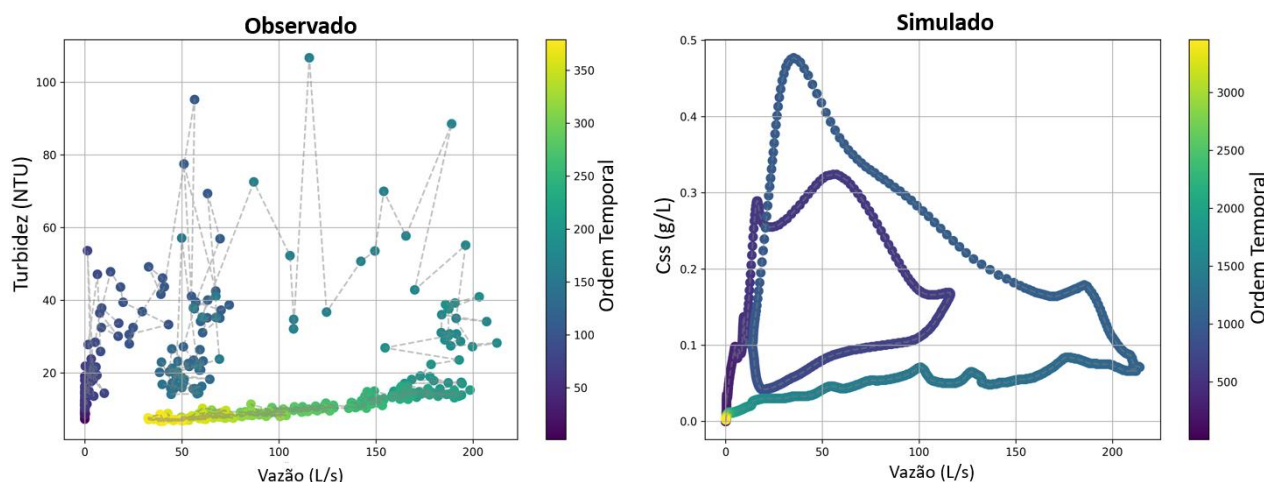


Figura 4 – Evento 2: curva de histerese para o evento de 10 de dez. 2023.

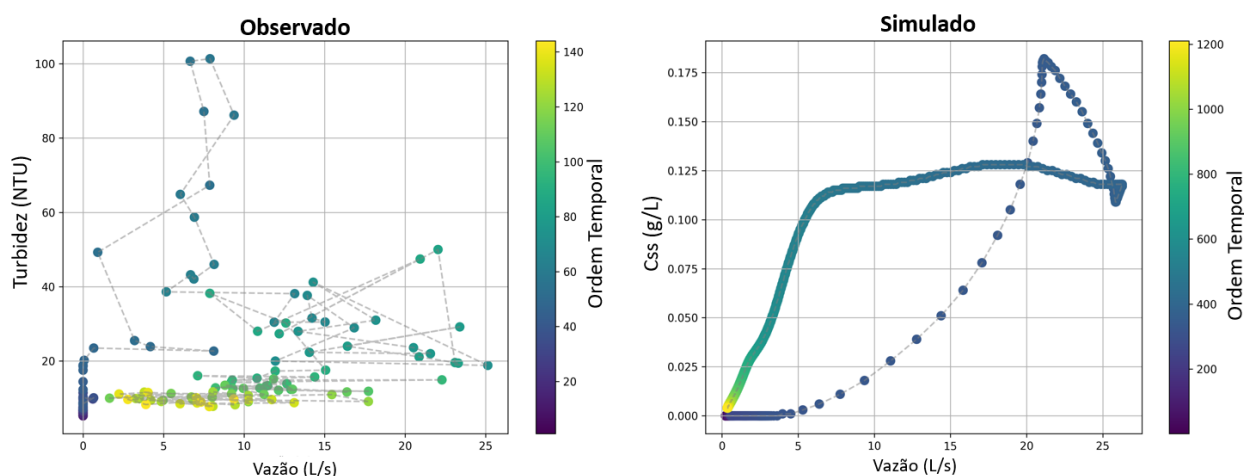


Figura 5 – Evento 3: curva de histerese para o evento de 15 de nov. de 2023.

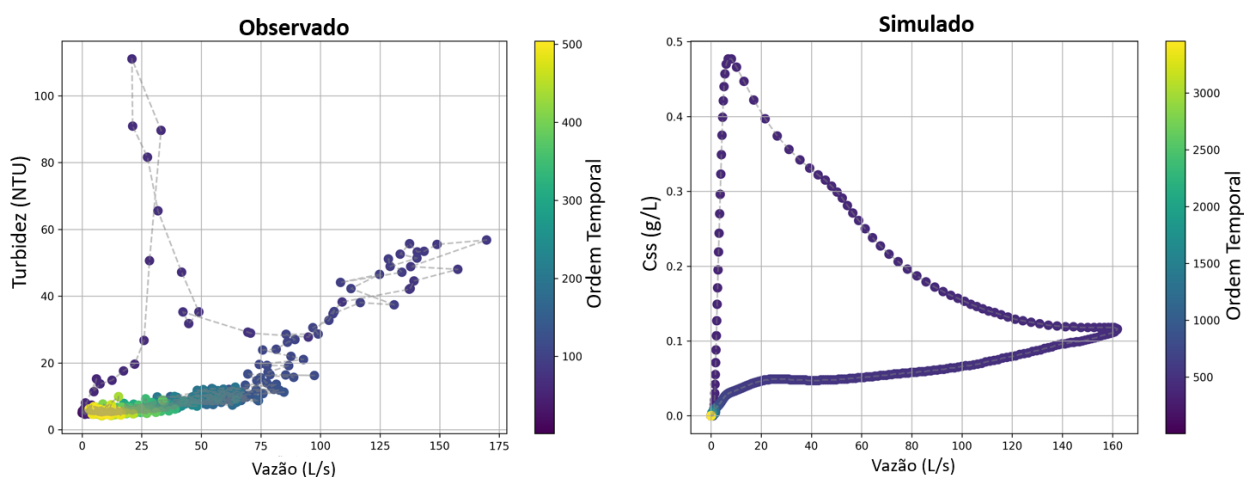
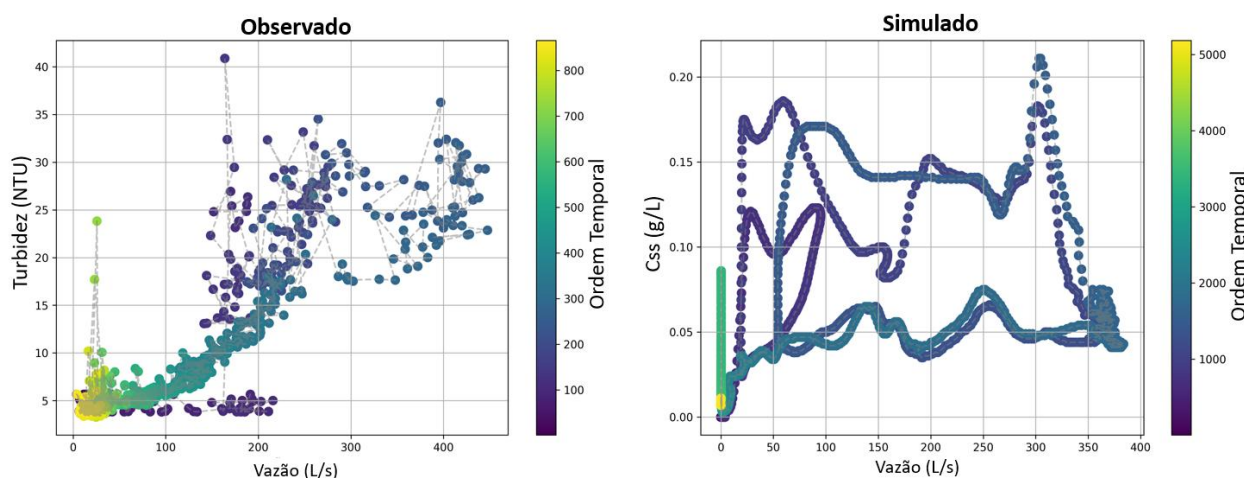


Figura 6 – Evento 4: curva de histerese para o evento de 17/20 de nov. 2023.



Dentre as interpretações possíveis quanto à orientação do laço nas curvas de histerese, destacam-se:

- Laço horário: indica que a concentração de sedimentos é maior durante a subida da vazão, podendo indicar fontes de sedimento próximas ao canal (resposta rápida);

- Laço anti-horário: indica que a concentração de sedimentos é maior durante a descida da vazão. Pode indicar fontes mais distantes;
- Laço não definido: Indica múltiplas fontes de sedimento e/ou mudanças nos mecanismos de transporte ao longo do evento.

Dentre os resultados obtidos, observa-se que, no evento 1, tanto os dados observados quanto os simulados apresentam laços no sentido horário, o que pode indicar que a principal fonte de sedimentos está localizada próxima ao exutório da bacia. Além disso, o hidrograma desse evento é composto por dois picos de vazão distintos, o que é claramente perceptível na curva de histerese dos dados simulados, na qual se identificam dois laços horários correspondentes a esses picos.

No evento 2, observa-se um comportamento oposto: enquanto a curva dos dados observados não apresenta um padrão de histerese definido, a curva dos dados simulados mostra um laço no sentido anti-horário, o que sugere que os sedimentos podem ter origem em áreas mais distantes da bacia, com processos de transporte mais lentos.

No evento 3, volta-se a observar um laço claramente definido no sentido horário em ambas as curvas de histerese, indicando novamente fontes de sedimento mais próximas ao canal.

No evento 4, por sua vez, tanto os dados observados quanto os simulados apresentam curvas sem um laço definido. Esse comportamento pode ser atribuído à elevada magnitude do evento, que registrou precipitações da ordem de 142 mm. Em eventos dessa intensidade, é esperado que diferentes processos de geração e transporte de sedimentos sejam ativados simultaneamente, resultando em histereses complexas e sem padrão definido. Esse comportamento sugere o aporte de sedimentos provenientes de múltiplas fontes e mecanismos distintos.

Disponibilidade de sedimentos

Dentre os eventos analisados, destaca-se a importância da disponibilidade de sedimentos na resposta hidrossedimentológica da bacia. Observa-se que, mesmo em eventos com características semelhantes de precipitação, a resposta da bacia pode variar significativamente em função da quantidade de sedimentos disponíveis para transporte. No contexto deste estudo, a disponibilidade de sedimentos mostrou-se um fator determinante na forma das curvas de histerese e, consequentemente, na compreensão das fontes e dinâmicas de aporte de sedimentos nos eventos analisados.

O evento 3, apesar de apresentar a menor magnitude de precipitação (28,4 mm), foi responsável por provocar a maior resposta em termos de turbidez. Esse comportamento pode ser explicado pela elevada disponibilidade de sedimentos no início do evento. O evento 1, que o antecedeu, teve papel importante nesse contexto, pois contribuiu para o destacamento de sedimentos que permaneceram disponíveis para transporte no evento seguinte. Assim, observa-se que eventos de maior intensidade pluviométrica anteriores podem aumentar a quantidade de sedimentos disponíveis; no entanto, se o volume de escoamento for elevado, esses sedimentos podem ser completamente transportados, reduzindo a disponibilidade para eventos subsequentes.

As curvas de histerese do evento 3 reforçam essa interpretação, ao evidenciar a intensa mobilização de sedimentos durante o evento.

Já o evento 4, embora tenha apresentado a maior magnitude de precipitação dentre todos (142 mm), não resultou na maior resposta sedimentológica da bacia. Isso se deve ao fato de que a disponibilidade de sedimentos no momento desse evento era reduzida, uma vez que o evento 3, seu antecedente, promoveu o transporte da maior parte dos sedimentos disponíveis, mas não causou desagregação suficiente do solo para gerar nova disponibilidade. Esse comportamento também é

refletido na curva de histerese do evento 4, que não apresenta um laço claramente definido — indicando a atuação simultânea de diferentes processos e fontes de sedimentos durante o evento.

CONCLUSÕES

A disponibilidade de sedimentos é um fator crucial na análise da produção de sedimentos em bacias hidrográficas. As curvas de histerese constituem uma ferramenta útil para avaliar a relação entre vazão e concentração de sedimentos em suspensão ao longo de eventos de precipitação, permitindo inferências qualitativas sobre as fontes de sedimento, os processos de transporte e as respostas hidrossedimentológicas da bacia.

Entretanto, o uso dessa abordagem apresenta diversas limitações, tanto metodológicas quanto interpretativas. Por esse motivo, as análises baseadas em curvas de histerese devem ser complementadas por modelagens hidrossedimentológicas e, sobretudo, por verificações em campo, que permitam validar as hipóteses levantadas e aprimorar a compreensão dos processos envolvidos.

A etapa mais crítica de todo o processo é a obtenção de dados confiáveis. O monitoramento hidrossedimentológico fornece a base necessária tanto para a aplicação das curvas de histerese quanto para a calibração e validação dos modelos. A capacidade de compreender a dinâmica da água e dos sedimentos em uma bacia hidrográfica, bem como de interpretar sua resposta frente a diferentes condições climáticas e de uso do solo, está diretamente relacionada à qualidade e à continuidade do monitoramento realizado.

REFERÊNCIAS

- ABATTI, B.H., ZANANDREA, F., MICHEL, G.P. “Aplicação de índice de conectividade de campo em uma pequena bacia”. In: anais do simpósio brasileiro de recursos hídricos, XXIV, 2021. Belo Horizonte – MG: ABRHidro, 2021, p. 1 – 2.
- ABATTI, B. H., ZANANDREA, F; PAUL, L. R., MICHEL, G. P. “Relevance of field data in the assessment of structural and functional sediment connectivity in a small catchment of southern Brazilian plateau”. *Earth Surface Processes and Landforms* (online), v. 1, p. 1-16, 2022.
- CARVALHO, Glauber Altrão et al. *Produção de sedimentos e efeito histerese na concentração de sedimentos*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017, Florianópolis. Anais eletrônicos... Porto Alegre: ABRHidro, 2017
- DANTAS, M. E.; VIERO, A. C.; SILVA, D. R. A., 2010. *Origem das Paisagens*. In: Viero, A. C.; Silva, D. R. A. (Org.). *Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul*. 1ed. Porto Alegre: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 1, p. 35-50.
- DA SILVA, G. S. et al. “Levantamento fitossociológico do estrato arbustivo regenerante em silvicultura de araucaria *Angustifolia* (bertol.) Kuntze na floresta estacional de São Francisco de Paula, RS, Brasil”. *Revista de Ciências Ambientais*, Canoas, v.6, n.2, 2012 p. 113 a 127.
- DE ROO, A.P.J., WESSELING, C.G., RITSEMA, C.J. *Lisem: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins*. I: theory, input and output. *Hydrol. Process.* 10, pp. 1107–1117. 1996.
- DÜMIG, A. et al. “*Araucaria forest expansion on grassland in the southern Brazilian highlands as revealed by ^{14}C and $\delta^{13}\text{C}$ studies*”. *Geoderma*, v. 145, n. 1–2, p. 143–157, 15 maio 2008.
- HAAN, C. T. *Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments*. In: HAAN, C. T.; BARFIELD, B. J.; HAYES, J. C. *Soil and Water Conservation Engineering*. 2. ed. London: Academic Press Limited, 1994. 588 p.
- Lacombe, G.; Cappelaere, B.; Leduc, C. *Hydrological impact of water and soil conservation works in the Merguellil catchment of central Tunisia*. *Journal of Hydrology*, v.359, p.210-224, 2008.

SEMA/GPDEN. “*Diagnóstico Preliminar: Descritivo dos eventos ocorridos no dia 5 de janeiro de 2017 entre as regiões dos municípios de São Francisco de Paula e Rolante/RS*”. Porto Alegre, RS: Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 2017.

SILVA, Alexandre Marco da; SCHULZ, Harry Edmar; CAMARGO, Plínio Barbosa de. *Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas*. 2. ed. Rima, 2007.

VAN DEURSEN, W.P. A.; WESSELING, C. G. *The PCRaster package*. Department of Physical Geography: Utrecht University, 1992.