

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

### **RESTAURAÇÃO ESTRUTURAL DE RIACHOS TROPICAIS COMO ESTRATÉGIA PARA O CONTROLE DA POLUIÇÃO DIFUSA DE SEDIMENTOS**

*João Miguel Mercês Bega<sup>1</sup> & Davi Gasparini Fernandes Cunha<sup>2</sup>*

**Abstract:** There is a pressing need for studies on stream restoration under stormflow conditions in tropical regions, as these hydrological regimes are often overlooked. This study evaluated the effects of structural in-situ interventions (cross-vanes and riffles) on the water quality of an urban tropical stream in Southeastern Brazil during rainfall events. Mass-volume [M(V)] curves and event mean concentrations (EMCs) of suspended solids were compared before and after restoration. The results revealed consistent signs of nonpoint source pollution in most monitored events. A pronounced first flush of suspended solids was observed pre-restoration but not afterward, likely due to changes in stream channel structure. However, EMCs post-restoration were higher than those pre-restoration, indicating limited effectiveness of the interventions in reducing downstream export of sediments. While the restoration structures may help prevent the first flush of suspended solids, they do not sufficiently reduce sediment loads. Thus, their design and maintenance should target sediment removal. Broader watershed-scale approaches are also necessary to achieve meaningful improvements in water quality in urban tropical streams.

**Keywords:** suspended solids, stormflow, and first flush.

**Resumo:** Há uma necessidade urgente de estudos sobre restauração de riachos sob condições de regime de cheia em regiões tropicais, uma vez que esses regimes hidrológicos são frequentemente negligenciados. O presente estudo avaliou os efeitos de intervenções estruturais in situ (cross-vanes e riffles) na qualidade da água de um riacho urbano tropical no Sudeste do Brasil durante eventos chuvosos. Curvas massa-volume [M(V)] e concentrações médias de evento (CMEs) de sólidos em suspensão foram comparadas antes e depois da restauração. Os resultados revelaram a ocorrência frequente de poluição difusa na maioria dos eventos monitorados. Um efeito de primeira carga de lavagem pronunciado de sólidos em suspensão foi observado no período pré-restauração, mas não após a intervenção, provavelmente devido às alterações na estrutura do canal do riacho. No entanto, as CMEs após a restauração foram superiores às observadas anteriormente, indicando eficácia limitada das intervenções na redução da exportação de sedimentos a jusante. Embora as estruturas de restauração possam ajudar a evitar a primeira carga de lavagem de sólidos em suspensão, elas não reduzem suficientemente a carga de sedimentos. Portanto, seu projeto e manutenção devem visar a remoção de sedimentos. Abordagens em escala de bacia hidrográfica também são necessárias para alcançar melhorias significativas na qualidade da água em riachos urbanos tropicais.

**Palavras-Chave** – sólidos em suspensão, regime de cheia e primeira carga de lavagem.

1) Departamento de Engenharia Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (SHS/EESC/USP). E-mail: joaobega@usp.br

2) SHS/EESC/USP. E-mail: davig@sc.usp.br

## INTRODUÇÃO

Riachos urbanos são frequentemente canalizados e enterrados como parte das soluções tradicionais de engenharia baseadas em infraestrutura cinza para o escoamento de águas pluviais e o descarte de águas residuárias (WILLIAMS; FILOSO, 2023). No entanto, tais ambientes não são apenas dutos neutros, mas sim ecossistemas ativos que promovem o fluxo de energia para as cadeias alimentares (COLE et al., 2007). Esses sistemas recebem, transportam e transformam materiais à medida que a água flui rio abaixo (CUNHA et al., 2022). A poluição difusa é uma das ameaças mais relevantes à qualidade da água urbana em escala global (LEI et al., 2021). Embora os poluentes de fontes difusas possam ser transportados por processos hidrológicos em condições de escoamento de base e de regime de cheia, a maior parte das cargas ocorre tipicamente durante eventos chuvosos, quando o escoamento superficial transporta poluentes da superfície do solo para os cursos de água (PAIVA et al., 2025). Esse tipo de poluição depende fortemente das características da precipitação e das áreas de drenagem, o que torna impossível determinar sua origem exata. A contribuição da vazão de cheia para a exportação de poluentes em cursos de água de países em desenvolvimento ainda é desconhecida, assim como a forma como essa contribuição pode variar em resposta a ações de restauração ou outras interferências antrópicas nos sistemas aquáticos.

Intervenções estruturais para a restauração de riachos consistem em interferências diretas nos cursos de água com o objetivo de aumentar a complexidade do canal, recriar meandros, remover barragens ou estruturas lineares de concreto e melhorar a conectividade lateral. Essas medidas podem alterar os caminhos do fluxo e o tempo de residência hidráulica da água, criar habitats para uma comunidade aquática mais diversa, aumentar a capacidade de retenção de sólidos e outros materiais bioreativos, além de reduzir a erosão (ANLANGER et al., 2022; FURLEY et al., 2023). Os efeitos das estratégias de restauração de riachos têm sido mais frequentemente estudados em condições de escoamento de base (MARCE et al., 2018). Todavia, o transporte de poluentes-chave, como sedimentos, ao longo da rede de drenagem pode ocorrer especialmente durante eventos de escoamento superficial decorrentes de chuvas intensas (WILLIAMS; FILOSO, 2023). Portanto, estudos adicionais em riachos restaurados durante condições de regime de cheia são essenciais para avaliar melhor se as estratégias de restauração de riachos têm impactos positivos, neutros ou negativos na qualidade da água sob esses regimes hidrológicos. No entanto, ressalta-se que a adição pontual de estruturas em riachos urbanos tem sido considerada uma medida provisória, até que métodos de restauração passiva aumentem suficientemente o recrutamento natural (PESS et al., 2023).

Neste contexto, o presente trabalho buscou avaliar os efeitos de intervenções estruturais in-situ para a restauração de riachos no controle da poluição difusa de sedimentos em um curso de água tropical que drena uma bacia hidrográfica em área urbana. Foram comparadas curvas massa(volume) [M(V)] e concentrações médias de evento (CMEs) de sólidos suspensos fixos (SSF), sólidos suspensos voláteis (SSV) e sólidos suspensos totais (SST) durante condições de regime de cheia entre os períodos pré e pós-restauração. A principal hipótese deste estudo é que o efeito da primeira carga de lavagem (PCL) seria observado no riacho estudado para todas as frações de sólidos analisadas durante o período pré-restauração. Ademais, supõe-se que as intervenções estruturais eliminariam a ocorrência desse efeito ou resultariam, indiretamente, na redução das CMEs.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo

Os experimentos foram conduzidos em um curso de água de terceira ordem no Sudeste do Brasil (21°59'58" S; 47°54'03" W). A bacia hidrográfica (11,18 km<sup>2</sup>) do riacho apresenta características de

urbanização, particularmente evidentes nas porções mais baixas e em transição de uso nas porções mais elevadas. Esta área de estudo é um exemplo representativo do processo de urbanização observado em muitas regiões brasileiras, no qual espaços urbanos se expandem sobre áreas agrícolas. A bacia abrange o riacho principal estudado (extensão ~ 4,7 km) e seis afluentes. Na porção urbana, o riacho apresenta vegetação ripária degradada, substratos alterados, sinais de erosão e lançamentos de águas pluviais. A paisagem local é caracterizada por vegetação secundária típica do bioma Cerrado, em transição para a Mata Atlântica. A precipitação anual total na região é de aproximadamente 1.500 mm, com verões chuvosos (média mensal > 150 mm) e invernos secos (< 70 mm). O clima é classificado como subtropical úmido mesotérmico (Cwa), com temperaturas médias mensais do ar variando entre 17 e 23 °C (KOTTEK et al., 2006).

### **Intervenções estruturais in-situ para a restauração do riacho**

As intervenções estruturais foram instaladas ao longo de quinze dias em setembro de 2023, um dos meses com menor precipitação total, no trecho urbano do riacho estudado (extensão ~ 900 m). A estratégia adotada consistiu na intercalação de: (1) cross-vanes (estruturas transversais ao canal que promovem controle de declividade, dissipação de energia, desvio do fluxo e formação de poças) e (2) riffles (estruturas de controle de declividade e habitat, construídas para alterar o fluxo e reduzir o transporte de sedimentos a jusante na rede de drenagem). Essas técnicas foram escolhidas em razão do seu uso frequente em projetos de restauração de riachos na América do Norte e Europa (ANLANGER et al., 2022; ARANGO et al., 2015). No entanto, não há estudos prévios sobre seus efeitos em riachos tropicais no Brasil. Ainda, as pesquisas sobre o impacto dessas intervenções estruturais na qualidade da água de riachos durante condições de regime de cheia, utilizando métricas de poluição difusa, tais como CMEs e a curvas M(V), são limitadas em todo o mundo.

Tanto os cross-vanes quanto os riffles são, normalmente, construídos de troncos de madeira, rocha ou uma combinação desses materiais. Neste estudo, foram priorizados troncos de madeira robustos e rochas encontradas nas proximidades do riacho para confecção das estruturas. Quando indisponíveis, foram utilizados sacos de ráfia (60 x 90 cm) preenchidos com areia (1.500 kg m<sup>-3</sup>). Estes sacos apresentam alta resistência a impactos, agentes químicos e solventes, sendo, portanto, alternativas eficazes para suporte estrutural em intervenções em riachos. As estruturas foram posicionadas em oito transectos do riacho, na seguinte ordem, partindo do início do trecho urbano até o exutório da bacia: cross-vanes (30 m), riffles (130 m), cross-vanes (230 m), riffles (330 m), cross-vanes (460 m), riffles (580 m), cross-vanes (680 m) e cross-vanes e riffles (830 m).

### **Estratégia de amostragem**

Foram analisados os efeitos das intervenções estruturais na atenuação da poluição difusa em um riacho urbano durante condições de regime de cheia. Os eventos de precipitação foram monitorados no período pré-restauração (cinco), entre dezembro de 2022 e maio de 2023, e no período pós-restauração (três), entre janeiro e fevereiro de 2024. Dada a dependência do estudo em relação aos dados de precipitação (resolução: horária), foram utilizados meteogramas, acessíveis pelos sites do CPTEC/INPE e do Radar Bauru/Unesp, para identificar eventos propícios à geração de escoamento superficial. Além disso, também foram observadas formações de nuvens em campo, o que permitiu identificar a iminência de precipitação. Os índices de precipitação (altura pluviométrica, duração da chuva, intensidade da chuva e número de dias antecedentes sem chuva) foram obtidos ou calculados a partir de dados de uma estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada dentro da área da bacia hidrográfica estudada. Para o cálculo do número de dias

anteriores sem chuva, foram excluídos eventos com altura pluviométrica inferior a 2 mm, pois assumiu-se que tais eventos gerariam escoamento superficial mínimo e, portanto, seriam desprezíveis.

Os níveis de água durante os eventos foram medidos por meio de um limnómetro (régua), instalado no exutório da bacia. As vazões foram calculadas através de uma curva-chave (Equação 1), desenvolvida para o riacho estudado, no local onde os níveis foram medidos (FAVA, 2019). Antes dos experimentos, embora o limnómetro esteja fixado em um trecho canalizado em concreto do riacho monitorado, a curva foi testada com medições de vazão atuais e considerada adequada para uso.

$$Q = 24,191h^3 - 41,262h^2 + 33,249h - 5,951 \quad (1)$$

onde  $Q$  é a vazão ( $m^3 s^{-1}$ ) e  $h$  é o nível de água (m).

As amostras de água do riacho foram coletadas manualmente no exutório da bacia hidrográfica. Frascos de polietileno com capacidade de um litro foram utilizados para coletar amostras de água superficial, a aproximadamente 10 cm da superfície, que foram armazenadas e transportadas até o laboratório. As coletas foram realizadas (~ 10 a 12 amostras por evento) com base nas variações do nível da água e da intensidade da chuva. Em todos os eventos de precipitação monitorados, a amostragem foi realizada nas fases ascendente e descendente do hidrograma e também no início e no fim da condição de regime de cheia (valores de vazão de base). Os parâmetros analisados foram SSF, SSV e SST, determinados por método gravimétrico em amostras não filtradas.

Com o objetivo de capturar alterações na hidrogeomorfologia do riacho decorrentes das intervenções, foram medidas as larguras molhadas em quarenta transectos uniformemente distribuídos ao longo do trecho restaurado. Além disso, nos mesmos transectos foram realizadas medições da profundidade da água em três pontos transversais (margem esquerda, centro e margem direita). Essas medições foram efetivadas durante condições de escoamento de base nos períodos pré-restauração ( $n = 7$ ) e pós-restauração ( $n = 6$ ), com campanhas bimestrais. Os resultados foram agrupados e expressos como médias para cada período. Também foram identificados os tipos de substrato predominantes (areia, argila, cascalho e rocha) antes da primeira campanha do período pré-restauração e antes da última campanha do período pós-restauração. As medições foram realizadas nos mesmos três pontos dos transectos mencionadas anteriormente. Os resultados foram expressos como a porcentagem relativa de cada tipo de substrato.

### **Caracterização da poluição difusa**

As CMEs dos sólidos em suspensão fixos, voláteis e totais foram calculadas para todos os eventos chuvosos monitorados. Curvas adimensionais  $M(V)$  também foram construídas. A ocorrência do fenômeno da PCL foi investigada para os mesmos parâmetros, permitindo comparações entre os períodos pré e pós-restauração. As CMEs e as curvas  $M(V)$  normalizam a massa dos poluentes e o volume de água drenado ao longo de todo o evento chuvoso, possibilitando comparações entre precipitações com características pluviométricas distintas.

De acordo com a Equação 2, a CME representa uma concentração média ponderada pelo fluxo, calculada como a razão entre a massa total do poluente e o volume total de escoamento gerado durante todo o evento de precipitação (CHARBENEAU; BARRETT, 1998).

$$CME = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^{t_r} C_t Q_t dt}{\int_0^{t_r} Q_t dt} \cong \frac{\sum C_t Q_t \Delta t}{\sum Q_t \Delta t} \quad (2)$$

onde M é a massa total do poluente ao longo de toda a condição de escoamento gerado pela chuva (g), V é o volume total de água durante essa condição (m<sup>3</sup>), t<sub>r</sub> é a duração do escoamento superficial (min), c<sub>t</sub> é a concentração variável no tempo (mg L<sup>-1</sup>), q<sub>t</sub> é a vazão variável no tempo (m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>) e Δt é o intervalo de tempo discreto (min).

As curvas M(V), por sua vez, representam a fração acumulada da massa total como função da fração acumulada do volume total de escoamento drenado pelo curso de água no exutório da bacia durante a precipitação. Estas possibilitam a verificação da ocorrência da PCL por meio, por exemplo, do método gráfico de Geiger (1987). O fenômeno é mais provável em um determinado tempo se a massa acumulada adimensional do poluente (L) exceder o volume acumulado adimensional do escoamento (F) em qualquer instante durante a condição de regime de cheia. Uma linha de 45°, ao se plotar L em função de F, indica que os poluentes estão distribuídos uniformemente ao longo do evento de chuva. Quando os dados de um determinado evento se situam acima da bissetriz (linha de 45°), há ocorrência da PCL. Assume-se que há diluição quando os dados se situam abaixo da bissetriz.

### Análises estatísticas

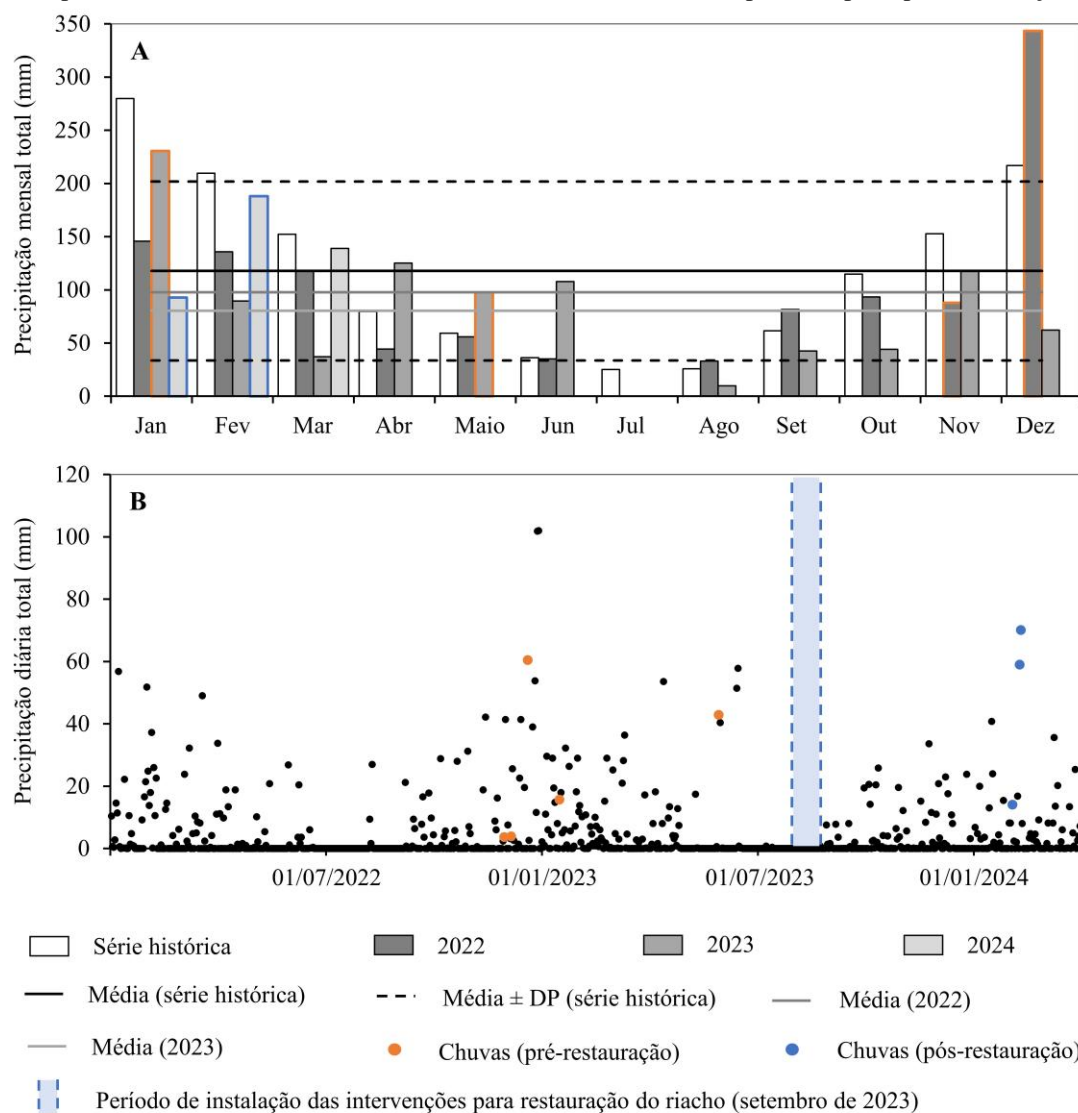
O teste t para amostras pareadas foi utilizado para verificar a ocorrência de diferenças estatisticamente significativas nas CMEs dos parâmetros avaliados durante condições de regime de cheia, bem como nas variáveis hidrogeomorfológicas, entre os períodos pré e pós-restauração. Para garantir a validade das análises, a transformação logarítmica natural (ln) foi aplicada aos dados, quando necessário, a fim de atender ao pressuposto de normalidade (teste de Shapiro-Wilk, p > 0,05). Todas as análises estatísticas foram realizadas no software Origin, Versão 2024 (OriginLab Corporation, Northampton, MA, EUA). O nível de significância adotado foi de p < 0,05.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente estudo abrangeu oito eventos de precipitação com características distintas, incluindo cinco eventos do período pré-restauração e três do período pós-restauração (Figura 1; Tabela 1). A duração da precipitação variou de 21 a 152 min (médias globais pré vs. pós-restauração: 88 ± 52 vs. 90 ± 52 min, respectivamente) e a altura pluviométrica oscilou entre 3,6 e 70,0 mm (16,7 ± 16,6 vs. 47,6 ± 29,8 mm). Isso resultou em intensidades de 4,2 a 68,9 mm h<sup>-1</sup> (13,0 ± 7,2 vs. 45,1 ± 34,5 mm h<sup>-1</sup>). Como os eventos foram monitorados principalmente durante a estação chuvosa (Figura 1B), os dias antecedentes sem chuva foram predominantemente baixos e variaram de 0,4 a 18,6 d (4,6 ± 7,9 vs. 1,8 ± 0,9 d). Além disso, os totais anuais de precipitação na área nos anos em que foram conduzidos os experimentos [2022 (1.174 mm) e 2023 (965 mm)] foram inferiores à média histórica (1.414 mm) (Figura 1A). Sobre as medições diretas no curso de água, os níveis basais foram semelhantes em todos os eventos pluviométricos monitorados, enquanto os níveis máximos de água variaram de 0,37 a 2,20 m (0,70 ± 0,30 vs. 1,40 ± 0,72 m) (Tabela 1). Maiores diferenças foram observadas nas vazões médias, que variaram de 1,4 a 29,1 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (3,1 ± 1,5 vs. 12,9 ± 14,2 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>).



Figura 1 – (A) Precipitação mensal total registrada pela estação pluviométrica localizada na bacia hidrográfica monitorada referente à série histórica (1990 – 2023) e aos anos com eventos de chuva monitorados (2022, 2023 e 2024) e (B) precipitação diária total durante os mesmos anos. As colunas demarcadas em laranja e azul representam, respectivamente, os meses com eventos de chuva monitorados nos períodos pré e pós-restauração

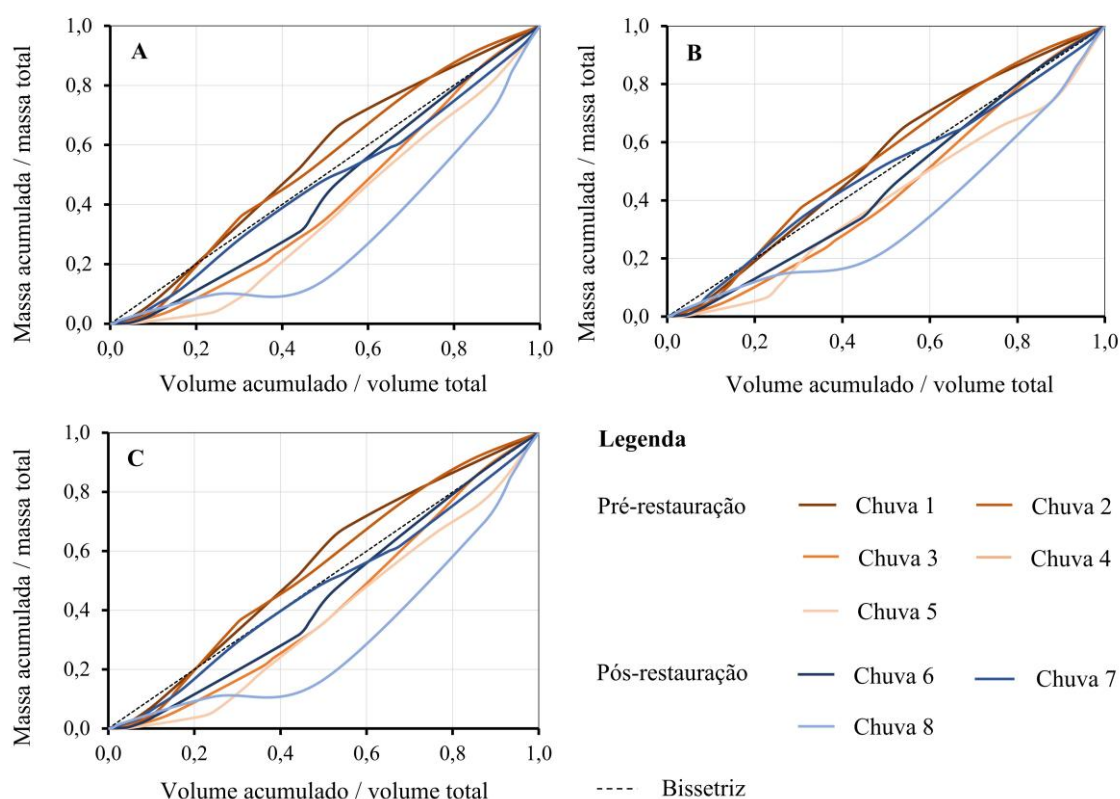


As curvas M(V) apresentaram variação significativa, mas alguns padrões foram observados (Figura 2). De modo geral, houve evidências de poluição difusa no riacho estudado para os sólidos em suspensão na maioria dos eventos chuvosos, uma vez que as curvas estiveram predominantemente alinhadas com a bissetriz, tanto nas campanhas de amostragem pré- quanto pós-restauração. A vegetação ripária no trecho encontra-se degradada. A presença de vegetação é amplamente documentada como um fator de controle da entrada de sedimentos nos cursos de água durante eventos chuvosos, além de reduzir os processos erosivos nas margens dos canais (MARTINS et al., 2021). Ademais, sedimentos depositados sobre superfícies de solo exposto e vias urbanas são rapidamente transportados para os cursos de água por meio do sistema de drenagem durante eventos de precipitação, muitas vezes acompanhados por possíveis lançamentos irregulares de efluentes domésticos (PAIVA et al., 2025). No riacho estudado, os parâmetros SSF e SSV apresentaram curvas M(V) com padrões semelhantes ao longo dos eventos de precipitação, indicando que as fontes de sólidos na bacia contribuíram com uma mistura das duas frações (orgânica e inorgânica).

Tabela 1 – Eventos chuvosos monitorados nos períodos pré e pós-restauração e variáveis no curso de água.  
Abreviações: d, duração da precipitação; h, altura pluviométrica; I, intensidade da chuva; DAsC, dias antecedentes sem chuva; B, nível basal da água; P, nível de pico da água; QP, vazão de pico; e QM, vazão média

| Restauração | Chuva | d<br>(min) | h<br>(mm) | I<br>(mm h <sup>-1</sup> ) | DAsC<br>(d) | B<br>(m) | P<br>(m) | QP<br>(m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ) | QM<br>(m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ) |
|-------------|-------|------------|-----------|----------------------------|-------------|----------|----------|---|---|
| Pré         | 1     | 51         | 3,6       | 4,2                        | 0,8         | 0,28     | 0,37     | 1,9                                     | 1,4                                     |
|             | 2     | 21         | 3,8       | 10,9                       | 0,4         | 0,29     | 0,43     | 2,6                                     | 1,8                                     |
|             | 3     | 152        | 44,4      | 17,5                       | 0,8         | 0,30     | 1,00     | 10,2                                    | 4,2                                     |
|             | 4     | 116        | 15,6      | 22,8                       | 2,4         | 0,36     | 1,00     | 10,2                                    | 4,9                                     |
|             | 5     | 100        | 16,2      | 9,7                        | 18,6        | 0,35     | 0,70     | 5,4                                     | 3,3                                     |
| Pós         | 6     | 150        | 13,8      | 5,5                        | 2,0         | 0,25     | 0,80     | 5,4                                     | 2,8                                     |
|             | 7     | 58         | 58,9      | 60,9                       | 2,6         | 0,27     | 1,20     | 16,3                                    | 6,7                                     |
|             | 8     | 61         | 70,0      | 68,9                       | 0,9         | 0,29     | 2,20     | 125,1                                   | 29,1                                    |

Figura 2 – Conjunto de curvas M(V) para (A) sólidos suspensos fixos, (B) sólidos suspensos voláteis e (C) sólidos suspensos totais, obtidas durante os eventos de precipitação monitorados nos períodos pré e pós-restauração



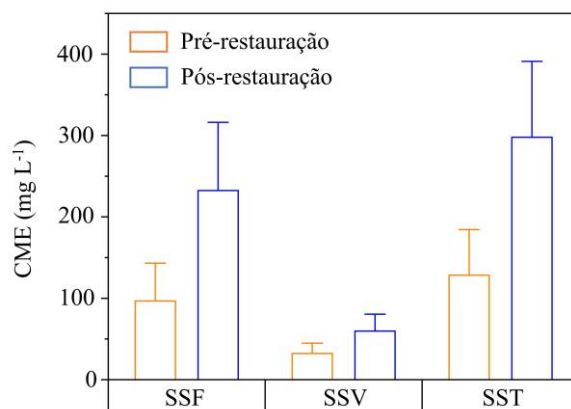
Observou-se, ainda, um efeito expressivo da PCL de sólidos em suspensão no período pré-restauração, enquanto que esse padrão não foi frequentemente observado no período pós-restauração (Figura 2). Entre outros fatores, as estruturas foram capazes de reter as primeiras ondas de sedimentos, provavelmente devido às mudanças hidrogeomorfológicas induzidas no canal do riacho observadas no curto prazo. Imediatamente a montante das estruturas, formaram-se zonas com maior tempo de detenção hidráulica em condições de escoamento de base, o que levou a um aumento local da largura molhada e da profundidade da lâmina de água. Essas estruturas também resultaram em acúmulo significativo de sedimentos [composição do substrato pré vs. pós-restauração: areia (51 vs. 66%),

cascalho (12 vs. 23%), argila (11 vs. 1%) e rocha (26 vs. 10%)), o que reduziu a profundidade da água poucos dias após as intervenções. Os resultados do teste t para amostras pareadas mostraram que o riacho se tornou significativamente mais largo [pré vs. pós-restauração:  $3,20 \pm 0,25$  vs.  $3,52 \pm 0,26$  m ( $p = 0,0012$ )] e mais raso [ $0,22 \pm 0,04$  vs.  $0,16 \pm 0,04$  m ( $p = 0,0001$ )]. No entanto, ressalta-se que esses níveis elevados de sedimento tendem a diminuir com o tempo à medida que o sistema se estabiliza e retorna às condições prévias à restauração (SEAR et al., 1998). Embora este estudo tenha se concentrado em medições durante eventos de precipitação, períodos prolongados de observação poderiam fornecer informações valiosas sobre como essas medidas influenciam os indicadores de poluição difusa e a qualidade da água como um todo.

Durante os eventos chuvosos, o nível da água no riacho levou em média  $32 \pm 19$  min, considerando todas as chuvas pós-restauração, para ultrapassar a altura das estruturas ( $\sim 35$  cm) após o início da precipitação, o que provavelmente permitiu a retenção inicial de sedimentos. No entanto, os níveis de água aumentaram significativamente depois do tempo mencionado (média global do pico de nível da água pós-restauração:  $140 \pm 72$  cm), tornando as estruturas menos eficazes para esse fim, já que a água atingiu aproximadamente quatro vezes a altura delas. Isso sugere que tais intervenções são mais relevantes durante eventos de chuva de baixa intensidade, que provocam variações mínimas nos níveis de água do riacho. Todavia, altos volumes de precipitação são comuns em regiões tropicais (TANIWAKI et al., 2017) e eventos extremos tendem a se tornar mais frequentes com as mudanças climáticas (NAVARRO et al., 2024). Abordagens alternativas, para além daquelas projetadas para condições de vazão de base, devem ser implementadas em riachos urbanos para lidar com situações de escoamento superficial intenso. É importante comentar que as estruturas foram propositalmente projetadas com baixa altura para minimizar o risco de alagamento das residências vizinhas ao riacho.

Em relação às CMEs, os valores pré-restauração de SSF ( $96,7 \pm 40,2$  mg L<sup>-1</sup>), SSV ( $32,2 \pm 11,0$  mg L<sup>-1</sup>) e SST ( $128,4 \pm 48,5$  mg L<sup>-1</sup>) foram significativamente menores do que os observados pós-restauração [ $232,4 \pm 83,7$  ( $p = 0,0012$ ),  $59,8 \pm 20,8$  ( $p = 0,0029$ ) e  $297,9 \pm 93,2$  mg L<sup>-1</sup> ( $p = 0,0003$ ), respectivamente] (Figura 3). As estruturas em escala de riacho implementadas in-situ neste estudo não foram capazes de reduzir o transporte de sólidos suspensos a jusante durante condições de regime de cheia, apesar de terem auxiliado no controle da PCL, provavelmente em razão das elevadas cargas de sedimentos geradas na área de drenagem. Isso evidencia a necessidade de considerar toda a bacia hidrográfica para aumentar a eficácia de ações de restauração em áreas urbanas. A implementação de medidas de controle da PCL em escalas menores, como nos exutórios de tributários ou dentro de áreas residenciais, pode ser uma estratégia crucial para mitigar a poluição difusa.

Figura 3 – Concentrações médias de evento (CMEs) de sólidos suspensos fixos (SSF), sólidos suspensos voláteis (SSV) e sólidos suspensos totais (SST) durante os eventos de chuva monitorados nos períodos pré e pós-restauração. As barras de erro representam a faixa de incerteza associada à estatística resumida





Da comparação das CMEs de SSF e SSV, observou-se que a maior parte dos sólidos suspensos no riacho durante os eventos de chuva era composta por SSF, evidenciando a ocorrência de processos erosivos intensos na bacia contribuinte, onde minerais provenientes de solos arenosos ficam expostos em razão da vegetação ripária degradada ou ausente. A composição do substrato do riacho indicou que as intervenções resultaram na acumulação de sedimentos, provavelmente como consequência da redução da velocidade da água imediatamente a montante das estruturas, conforme supracitado. No entanto, essa retenção foi temporária. Os sedimentos foram transportados quando os eventos de chuva se tornaram mais intensos, como resultado de aumentos significativos no nível da água. A remoção de sedimentos acumulados e a limpeza periódica dessas estruturas são necessárias para evitar o seu bom funcionamento. Sem manutenção regular, os sedimentos continuarão se acumulando até que um evento de precipitação suficientemente intenso remova esse acúmulo.

Por fim, argumenta-se que os riachos se encontram, na maior parte do tempo, em condições de escoamento de base, especialmente em sistemas urbanos, onde as respostas aos eventos de chuva são rápidas e logo retornam às condições pré-evento. Apesar do papel dominante da vazão de base, que pode ofuscar a influência da vazão de cheia, esta pesquisa demonstrou que quantidades significativas de sedimentos são transportadas a jusante por cursos de água urbanos em regiões tropicais. Esse resultado destaca a necessidade de considerar tais processos no gerenciamento de recursos hídricos urbanos e em projetos de restauração de riachos, bem como a importância de monitorar esses cursos de água em condições de vazão de cheia, independentemente do status de restauração.

## CONCLUSÃO

Os resultados do trabalho indicam que intervenções estruturais in situ em riachos, como cross-vanes e riffles, frequentemente projetadas para condições de escoamento de base, apresentam eficácia limitada na mitigação da poluição difusa durante condições de regime de cheia. Embora esse tipo de restauração possa impedir a ocorrência do fenômeno da PCL para os sólidos em suspensão, não se mostra eficaz na redução da exportação a jusante de sedimentos no sistema de drenagem. Há uma necessidade urgente de manejo eficiente dessas estruturas, por meio da remoção regular dos sedimentos acumulados, para aumentar sua eficiência e torná-las mais adequadas à aplicação em projetos de restauração. Em áreas urbanas, as práticas de restauração também precisam ir além do próprio curso de água e considerar toda a bacia hidrográfica, a fim de alcançar melhorias significativas na qualidade da água, especialmente durante eventos de escoamento superficial. Espera-se que as informações geradas por esta pesquisa sejam valiosas para estudos futuros que busquem aprofundar o entendimento das relações observadas, sobretudo considerando que os efeitos dessas intervenções na qualidade da água diferem entre as condições de escoamento de base e de regime de cheia, além da disponibilidade global ainda limitada de dados relacionados.

## REFERÊNCIAS

- ANLANGER, C. et al. (2022). “Large wood in river restoration: A case study on the effects on hydromorphology, biodiversity, and ecosystem functioning”. *International Review of Hydrobiology* 107, pp. 34 – 45.
- ARANGO, C.P.; JAMES, P.W.; HATCH, K.B. (2015). “Rapid ecosystem response to restoration in an urban stream”. *Hydrobiologia* 749, pp. 197 – 211.
- CHARBENEAU, R.J.; BARRETT, M.E. (1998). “Evaluation of methods for estimating stormwater pollutant loads”. *Water Environment Research* 70, pp. 1295 – 1302.

- COLE, J.J. et al. (2007). *“Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget”*. Ecosystems 10, pp. 171 – 184.
- CUNHA, D.G.F. et al. (2022). *“Assessing restoration of ecosystem functioning in Brazilian subtropical and tropical streams”*. Limnology & Oceanography Bulletin 31, pp. 6 – 11.
- FAVA, M.C. (2019). *“Improving flood forecasting using real-time data to update urban models in poorly gauged areas”*. Tese (Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo).
- FURLEY, T.H. et al. (2023). *“Short-term hydromorphological and ecological responses of using woody structures for river restoration in a tailing-impacted tropical river”*. Integrated Environmental Assessment and Management 19, pp. 648 – 662.
- GEIGER, W.F. (1987). *“Flushing effects in combined sewer systems”* in Anais do 4<sup>th</sup> International Conference on Urban Storm Drainage, Lausanne, pp. 40 – 46.
- KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. (2006). *“World map of the Köppen-Geiger climate classification updated”*. Meteorologische Zeitschrift 15, pp. 259 – 263.
- LEI P. et al. (2023). *“A bibliometric analysis on nonpoint source pollution: Current status, development, and future”*. International Journal of Environmental Research and Public Health 18.
- MARCÉ, R. VON SCHILLER, D.; Aguilera, R.; MARTÍ, E.; BERNAL, S. (2018). *“Contribution of hydrologic opportunity and biogeochemical reactivity to the variability of nutrient retention in river networks”*. Global Biogeochemical Cycles 32, pp. 376 – 388.
- MARTINS, W.A.; MARTINS, L.L.; MARIA, I.C.; MORAES, J.F.L.; PEDRO JÚNIOR, M.J. (2021). *“Reduction of sediment yield by riparian vegetation recovery at distinct levels of soil erosion in a tropical watershed”*. Ciência e Agrotecnologia 45.
- NAVARRO, F.A.R.; MACEDO, M.B.; BENSO, M.R.; MENDIONDO, E.M. (2024). *“Urban ecohydrology under socioeconomic scenarios: The protagonism of natural-based solutions in a changing future”*. Ecohydrology & Hydrobiology 24, pp. 97 – 111.
- PAIVA, C.L.; BEGA, J.M.M.; ZAMBRANO, K.T.; CUNHA, D.G.F. (2025). *“The potential contribution of riparian vegetation in non-point source pollution control during rainfall events in a tropical urban watershed”*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos 30(22).
- PESS, G.R.; MCHENRY, M.L.; LIERMANN, M.C.; HANSON, K.M.; BEECHIE, T.J. (2023). *“How does over two decades of active wood reintroduction result in changes to stream channel features and aquatic habitats of a forest river system”*. Earth Surface Processes and Landforms 48.
- SEAR, D.A.; BRIGGS, A.; BROOKES, A. (1998). *“A preliminary analysis of the morphological adjustment within and downstream of a lowland river subject to river restoration”*. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems 8, pp. 167 – 183.
- TANIWAKI, R.H.; PIGGOTT, J.J.; FERRAZ, S.F.B.; MATTHAEI, C.D. (2017). *“Climate change and multiple stressors in small tropical streams”*. Hydrobiologia 793, pp. 41 – 53.
- WILLIAMS, M.R.; FILOSO, S. (2023). *“Changes in hydrology and pollutant loads from stream restoration in an urban headwater catchment”*. Journal of Hydrology 618.

**AGRADECIMENTOS** – O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.