

UTILIZAÇÃO DE ENSAIOS EM MESOCOSMOS COMO FERRAMENTA PARA O MANEJO DE RECURSOS HÍDRICOS

Ricardo H. Taniwaki¹; Mariana Morilla¹; Karoline V. Serpa²; Marcelo S. Moretti², Gabrielle S. S. Almeida¹, Fabiana Schneck³, Maria Gabrielle R. Maciel³ Matheus E. K. Ogasawara⁴ & Silvio F. B. Ferraz⁴

Abstract: Global changes, such as intensive land use, hydrological alterations, and diffuse pollution, pose increasing challenges to the conservation of aquatic ecosystems. This study synthesizes experiments conducted using the ExStream system, a continuous flow mesocosm platform, to assess the effects of multiple environmental stressors on benthic communities in tropical and subtropical streams. The trials were carried out at the Experimental Station of Forest Sciences (ESALQ/USP), employing structures with rigorous control of environmental variables while maintaining a high degree of ecological realism. Three distinct studies were considered. The first evaluated the influence of nitrate, sediment, and flow rate on algal biomass and diatom community structure, revealing synergistic effects among stressors and the importance of hydrological stability. The second analyzed the impacts of these same stressors on macroinvertebrates, demonstrating that sediments and low flow reduce species richness and favor tolerant taxa. The third study tested the effects of shading and habitat complexity, indicating that physical interventions can enhance community structure, particularly in terms of abundance and evenness. The results demonstrate that mesocosms are effective tools for investigating ecological mechanisms under realistic conditions, enabling predictions of responses to different degradation scenarios and guiding adaptive management strategies. The findings also underscore the need for integrated approaches to the functional restoration of tropical streams in the face of mounting environmental pressures.

Resumo: As mudanças globais, como o uso intensivo da terra, alterações hidrológicas e poluição difusa, impõem desafios crescentes à conservação de ecossistemas aquáticos. Este estudo apresenta uma síntese de experimentos realizados com o sistema ExStream, uma plataforma de mesocosmos de fluxo contínuo, para avaliar os efeitos de múltiplos estressores ambientais sobre comunidades bentônicas em riachos tropicais e subtropicais. Os ensaios foram conduzidos na Estação Experimental de Ciências Florestais da ESALQ/USP, utilizando estruturas com controle rigoroso de variáveis ambientais, mantendo alto grau de realismo ecológico. Três estudos distintos foram considerados. O primeiro avaliou a influência de nitrato, sedimento e vazão sobre a biomassa algal e a estrutura de comunidades de diatomáceas, revelando efeitos sinérgicos entre estressores e a importância da estabilidade hidrológica. O segundo analisou os impactos desses mesmos estressores sobre macroinvertebrados, mostrando que sedimentos e baixa vazão reduzem riqueza e favorecem espécies tolerantes. O terceiro estudo testou o efeito de sombreamento e complexidade do habitat, indicando que intervenções físicas podem melhorar a estrutura da comunidade, principalmente em termos de abundância e equitabilidade. Os resultados evidenciam que mesocosmos são ferramentas eficazes para investigar mecanismos ecológicos sob condições realistas, permitindo prever respostas a diferentes cenários de degradação e orientar ações de manejo adaptativo. Os achados também reforçam a necessidade de estratégias integradas para a restauração funcional de riachos tropicais frente às crescentes pressões ambientais.

1) Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do ABC, Santo André – SP, Brasil. ricardo.t@ufabc.edu.br

2) Laboratório de Ecologia de Insetos Aquáticos, Universidade Vila Velha, Vila Velha – ES, Brasil

3) Laboratório de Ecologia de Riachos, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande – RS, Brasil

4) Laboratório de Hidrologia Florestal, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba -SP, Brasil.

Palavras-Chave – riachos, estressores múltiplos, qualidade da água.

INTRODUÇÃO

A intensificação das mudanças globais — como alterações climáticas, uso da terra e poluição difusa — impõe novos desafios à conservação e ao manejo dos recursos hídricos (Taniwaki *et al.*, 2017). Riachos e pequenos cursos d'água, em especial, são altamente sensíveis a pressões antrópicas e respondem de maneira complexa a múltiplos estressores ambientais (Almeida *et al.*, 2025; Maciel *et al.*, 2025). Para compreender e mitigar esses efeitos, são necessárias abordagens experimentais que combinem controle rigoroso de variáveis com realismo ecológico (Macaulay *et al.*, 2025). Nesse contexto, os sistemas de mesocosmos, emergem como uma poderosa ferramenta para testar hipóteses ecológicas e informar estratégias de restauração e manejo sustentável de ecossistemas aquáticos.

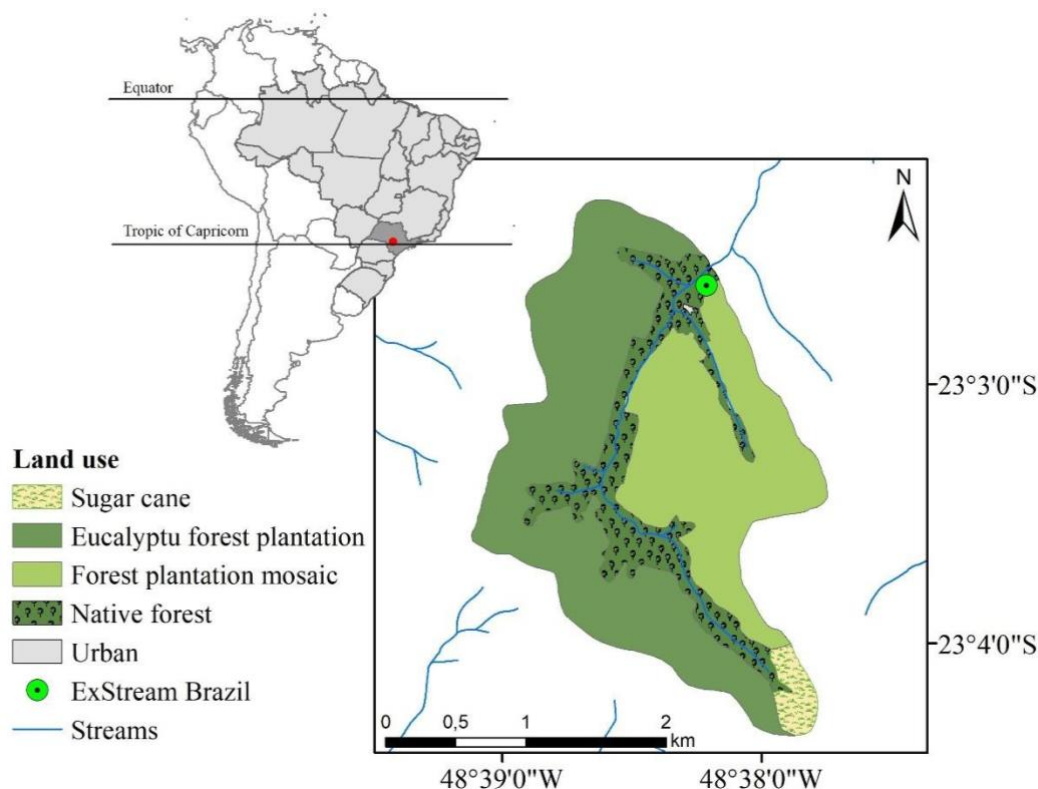
O uso de mesocosmos em estudos ecológicos oferece diversas vantagens metodológicas, especialmente quando se busca compreender processos em escalas realistas, mantendo controle experimental (Macaulay *et al.*, 2025). Os mesocosmos permitem a manipulação simultânea de múltiplos fatores ambientais em sistemas semi-naturais, proporcionando uma abordagem intermediária entre experimentos laboratoriais altamente controlados e estudos observacionais em campo (Almeida *et al.*, 2025; Maciel *et al.*, 2025). Essa configuração permite testar hipóteses em condições ecologicamente relevantes, como no caso da resposta das comunidades aquáticas a múltiplos estressores, com maior reprodutibilidade e robustez estatística. Além disso, os mesocosmos são particularmente úteis para avaliar interações complexas, como as entre fatores climáticos e nutrientes, possibilitando inferências causais mais precisas e com aplicabilidade direta à gestão ambiental e conservação.

Nesse sentido, o presente tem como objetivo demonstrar os principais resultados obtidos através de ensaios em mesocosmos no sistema ExStream – Um sistema de mesocosmos originalmente criado na Nova Zelândia, na qual permite testar interações entre diversos estressores ambientais e potenciais ações para restauração de riachos.

METODOLOGIA

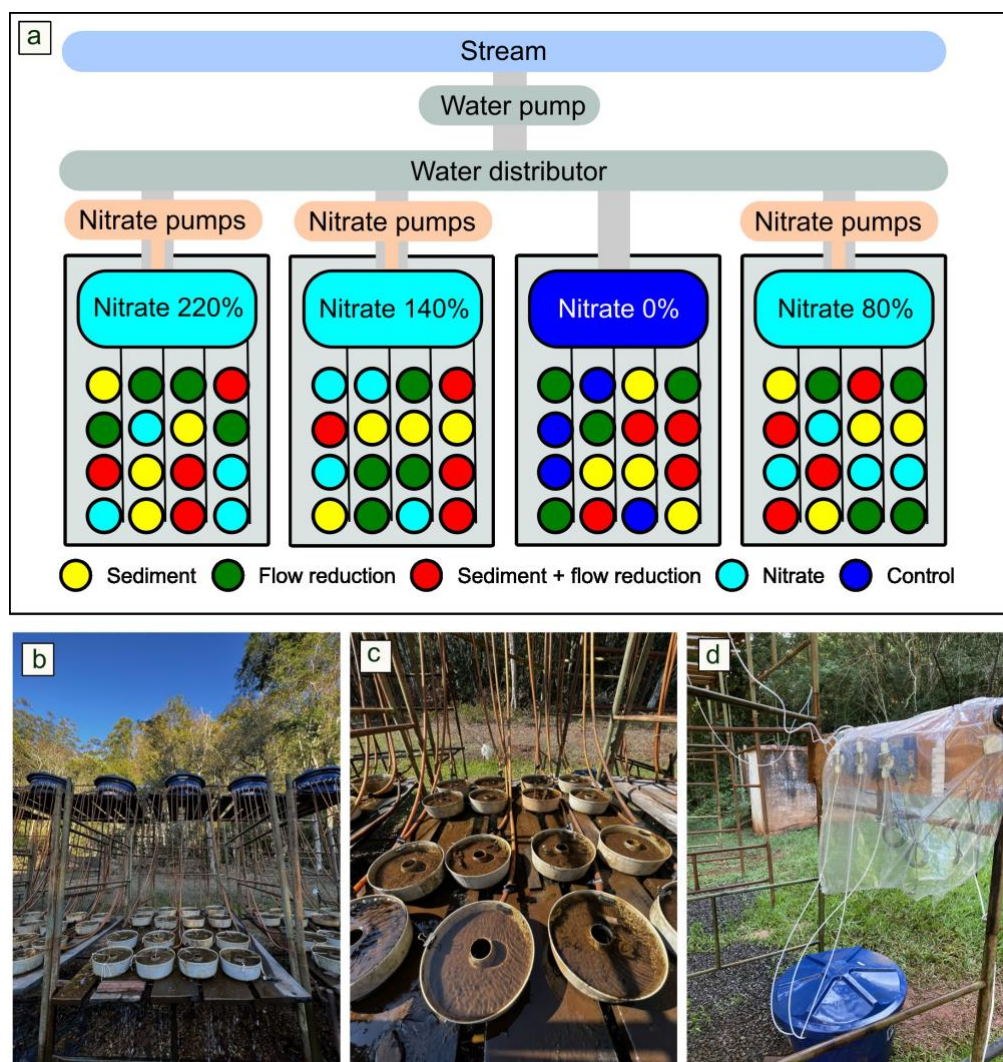
Os estudos foram conduzidos na Estação Experimental de Ciências Florestais (Itatinga – ESALQ/USP – EECFI) da Universidade de São Paulo, situada no município de Itatinga, Estado de São Paulo (latitude 23°10' S, longitude 48°40' W, altitude média de 850 metros acima do nível do mar e declividade média do terreno de 10%). A estação possui uma área total de 2.119 hectares, caracterizada por topografia suavemente ondulada e predominância de solos latossolo e podzólico. A cobertura vegetal é composta principalmente por plantações de Eucalyptus e Pinus, utilizadas tanto para fins experimentais quanto comerciais, com algumas áreas de vegetação nativa preservada (Gonçalves *et al.*, 2012). De acordo com a classificação climática de Köppen (Alvares *et al.*, 2013), o clima da região é do tipo Cwa (clima subtropical úmido), com invernos secos e verões quentes. A temperatura média anual é de 20 °C e a precipitação média anual é de 1.350 mm. O riacho que abastece o sistema de mesocosmos utilizado no estudo é um curso d'água de segunda ordem, que drena plantações de Eucalyptus misturadas com floresta nativa. O riacho possui uma faixa de vegetação ripária de mais de 30 metros em ambas as margens, com concentrações naturais de nitrato em torno de 3 mg/L e uma vazão média anual de 67 L/s (dados não publicados da Estação Experimental de Ciências Florestais – USP) (Figura 1).

Figura 1. Localização do “ExStream Brazil” e uso do solo na bacia hidrográfica de cabeceira, na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga (EECFI — ESALQ / USP). O cinza claro representa o Brasil na América do Sul e o cinza escuro representa o estado de São Paulo no Brasil. Sugarcane – cana-de-açúcar, Eucalyptus forest plantation – plantação de Eucalyptus, Forest plantation mosaic – mosaico de plantios florestais, Native forest – floresta nativa, Urban – construções urbanas, Streams – riachos.



O estudo foi realizado utilizando o sistema ExStream, um sistema de mesocosmos de fluxo contínuo ao ar livre, utilizado em diversos países, com mais de 30 artigos científicos revisados por pares publicados até o momento. Esse sistema oferece controle preciso das variáveis experimentais, excelente poder estatístico e alto grau de realismo de campo (Elbrecht *et al.*, 2016; Hunn *et al.*, 2024; Piggott; Townsend; Matthaei, 2015). O sistema utilizado neste estudo, denominado ExStream Brazil, foi instalado a 100 metros do riacho e consistia em uma estrutura com 4,1 metros de altura e 20 metros de comprimento, dividida em dois níveis (Fig. 2). O nível superior sustentava quatro tanques de polietileno com capacidade de 135 L cada, enquanto o nível inferior era composto por uma estrutura de madeira com 1 metro de altura por 1,2 metros de largura, projetada para acomodar os 64 mesocosmos. Cada mesocosmo tinha diâmetro externo de 25 cm, altura de 9 cm e capacidade de 3,5 litros, sendo equipado com uma válvula de controle de fluxo para regulação da água.

Figura 2. Configuração experimental do sistema ExStream Brazil utilizado em nosso estudo. (a) Representação esquemática dos tratamentos com estressores aplicados. (b) Foto do sistema. (c) Foto dos mesocosmos. (d) Foto das bombas de nitrato. Fonte: Almeida *et al.* (2025)



Uma bomba centrífuga (Schneider Monoestágio BC-92S 1B 3 CV, com capacidade máxima de 11,4 m³/h) foi instalada no riacho para manter o fluxo contínuo de água e organismos pelo sistema (Fig. 1a). A entrada da bomba era protegida por uma malha metálica de 4,5 mm para evitar entupimentos por galhos e folhas, além de uma proteção adicional com tela sobreposta (malha com abertura de 3 cm). Ambas as proteções eram limpas diariamente, pela manhã e à tarde, utilizando escova e pá.

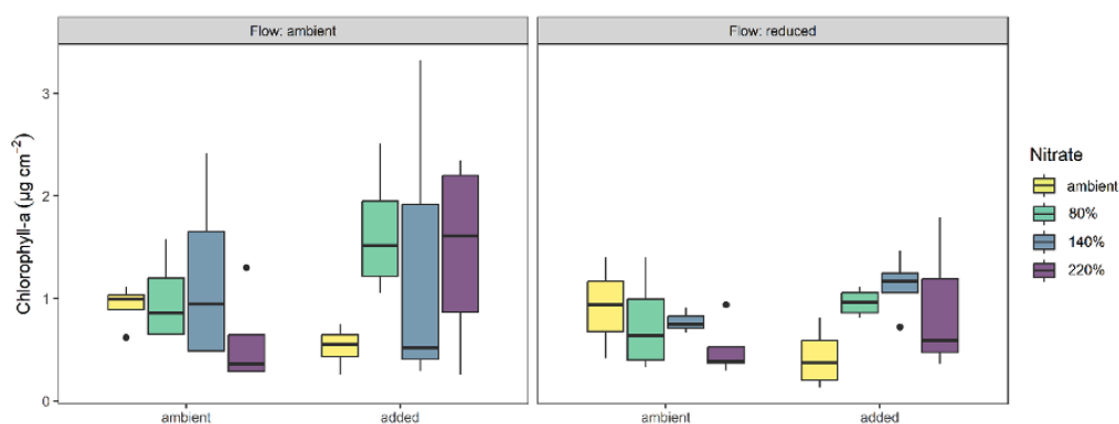
A água do riacho bombeada era transportada até um coletor central por meio de um tubo com 38 mm de diâmetro. Esse coletor distribuía a água para os quatro tanques superiores (cada um controlado por válvula de esfera manual) por tubos de polietileno com 19 mm de diâmetro. A partir dos tanques, a água era conduzida por gravidade até os 16 mesocosmos de cada tanque, por meio de mangueiras com 12,7 mm de diâmetro interno. A bomba era alimentada pela rede elétrica trifásica, e, embora tenham ocorrido algumas interrupções de energia durante o experimento, nenhuma delas excedeu duas horas de duração.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Três estudos recentes utilizando o sistema de mesocosmos ExStream demonstraram como múltiplos estressores ambientais, comuns em ambientes tropicais e subtropicais, impactam a estrutura e o funcionamento de comunidades bentônicas em riachos. Cada estudo focou em diferentes componentes bióticos (algas, diatomáceas e macroinvertebrados) e abordou tanto efeitos isolados quanto combinados de fatores como nutrientes, sedimentos, vazão, sombreamento e complexidade de habitat.

O estudo conduzido por Maciel *et al.* (2025) investigou os efeitos da adição de nitrato, deposição de sedimentos finos e redução de vazão sobre a biomassa bentônica (via clorofila-a) e a estrutura da comunidade de diatomáceas. Os resultados revelaram interações complexas entre os estressores: a deposição de sedimentos reduziu a clorofila-a em condições naturais de nitrato, mas aumentou sua biomassa quando os níveis de nitrato estavam elevados (Fig. 3). Esse efeito sugere uma relação sinérgica, onde o acúmulo de sedimentos atua como substrato favorável à proliferação algal apenas quando há disponibilidade elevada de nutrientes. Além disso, o aumento das concentrações de nitrato reduziu significativamente a riqueza e a equitabilidade de espécies de diatomáceas, promovendo comunidades mais dominadas. A composição das espécies foi alterada principalmente por dois fatores: a redução da vazão e os níveis elevados de sedimentos ou nitrato, evidenciando que a estabilidade hidrológica e a limitação de insumos agrícolas são determinantes para a manutenção da diversidade funcional em riachos tropicais.

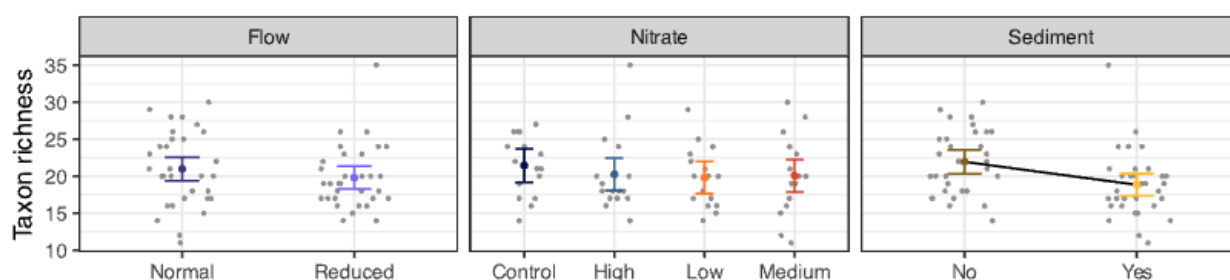
Figura 3. Concentrações de clorofila-a nos diferentes tratamentos realizados no sistema ExStream. Modificado de Maciel *et al.*, (2025). Flow = tratamentos de vazão. Nitrate = tratamentos de enriquecimento de nitrato. Eixo x+ tratamento de sedimentação.



No experimento conduzido por Almeida *et al.* (2025), foram testados os efeitos isolados e combinados de três estressores: enriquecimento por nitrato (em quatro níveis), aumento de sedimentos finos (80% acima do natural) e redução de vazão (66% de redução). A comunidade de macroinvertebrados respondeu de forma diferenciada a cada estressor. A adição de nitrato, até níveis moderados (140%), aumentou a equitabilidade da comunidade, indicando uma distribuição mais balanceada entre as espécies. Por outro lado, o excesso de sedimento reduziu a riqueza total e afetou especialmente os macroinvertebrados de maior porte, incluindo Chironomidae, provavelmente devido ao entupimento de espaços intersticiais e alteração na qualidade do habitat (Fig. 4). A redução de vazão influenciou negativamente a diversidade e a equitabilidade, favorecendo espécies tolerantes

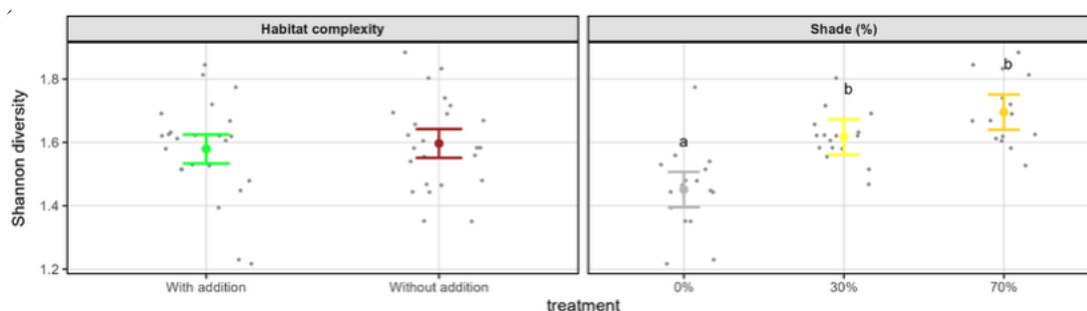
a baixa velocidade de corrente, como ostracodes. A combinação de sedimento com baixa vazão foi especialmente deletéria, levando à redução de táxons raros e à simplificação da estrutura da comunidade. Esses resultados sugerem que intensificação agrícola e alterações hidrológicas, relacionadas ou não às mudanças climáticas, afetam múltiplas dimensões da integridade ecológica.

Figura 4. Efeitos da vazão (flow), enriquecimento de nitrato (nitrate) e sedimentação (sediment) na riqueza da comunidade de macroinvertebrados bentônicos. Modificado de Almeida et al., (2025).



No estudo de Morilla *et al.* (*in prep.*), avaliou-se a influência do sombreamento (0%, 30% e 70%) e da complexidade estrutural do habitat (presença ou ausência de substrato adicional) sobre a recolonização da comunidade de macroinvertebrados ao longo de 42 dias. A aplicação de sombreamento teve um efeito positivo claro sobre a abundância, diversidade de Shannon e equitabilidade, indicando que a redução de radiação solar direta pode atenuar estressores térmicos e limitar a dominância de espécies oportunistas. A adição de complexidade estrutural aumentou a abundância total, mas não teve efeito significativo sobre os demais índices comunitários. A combinação de 70% de sombreamento com complexidade aumentada resultou nas maiores abundâncias e valores de equitabilidade, evidenciando o potencial de intervenções simultâneas para melhorar a estrutura da comunidade. No entanto, os efeitos sobre a riqueza taxonômica foram limitados, sugerindo que benefícios funcionais e estruturais nem sempre se traduzem em maior diversidade taxonômica em curto prazo.

Figura 5. Efeitos da complexidade de habitats (habitat complexity) e sombreamento (shade) na diversidade de macroinvertebrados bentônicos.



Esses três estudos demonstram, de forma complementar, que abordagens experimentais controladas em mesocosmos são capazes de revelar os efeitos sutis e interativos de múltiplos estressores comuns em ambientes de riachos tropicais. Eles fornecem subsídios fundamentais para o

planejamento de estratégias de manejo e restauração baseadas em evidências, permitindo a previsão de respostas ecológicas sob diferentes cenários de intensificação antrópica.

CONCLUSÕES

Os estudos apresentados neste trabalho reforçam o valor dos sistemas de mesocosmos, como o ExStream, na compreensão dos efeitos de múltiplos estressores ambientais sobre ecossistemas lóticos tropicais. A partir da manipulação controlada de variáveis como nutrientes, sedimentos, vazão, sombreamento e complexidade estrutural do habitat, foi possível detectar respostas diferenciadas entre grupos biológicos (microalgas, diatomáceas e macroinvertebrados), tanto em nível estrutural quanto funcional. Os resultados demonstraram que os efeitos dos estressores são frequentemente interativos e não aditivos, o que destaca a importância de abordagens experimentais que considerem a simultaneidade de pressões ambientais. O sombreamento e a restauração da complexidade do habitat mostraram-se intervenções eficazes na recuperação de processos ecológicos, como a decomposição orgânica e o aumento da equitabilidade das comunidades bentônicas. Por outro lado, a combinação de sedimentos finos e redução de vazão promoveu simplificação das comunidades e perda de táxons sensíveis, evidenciando os riscos da intensificação agrícola e das mudanças hidrológicas associadas às mudanças climáticas. Nesse sentido, os mesocosmos representam não apenas uma ferramenta valiosa para a pesquisa ecológica aplicada, mas também um componente estratégico para o desenvolvimento de políticas públicas de manejo adaptativo. Ao possibilitar a geração de evidências robustas em contextos ambientalmente relevantes, os estudos com mesocosmos contribuem diretamente para a construção de práticas de restauração mais eficazes, realistas e ajustadas às condições dos ecossistemas tropicais em transformação.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, G. S. S.; SAITO, V. S.; SARTORI, M.; SAULINO, H. H. L.; DA PENHA, L. O.; MIRANDA, P. S. C. T.; MORILLA, M.; RODRIGUES-MACIEL, M. G. ; COLLYER, G.; MORETTI, M. S.; SCHNECK, F.; PIGGOTT, J. J.; PIMENTEL, I.M.; MATTHAEI, C. D.; FERRAZ, S. F. B.; TANIWAKI, R. H. (2025). Experimental effects of multiple agricultural stressors on diversity and size structure of subtropical stream macroinvertebrates. **Environmental Advances**, [s. l.], v. 20, p. 100630. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2025.100630>.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; DE MORAES G.J.L. ; SPAROVEK, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [s. l.]. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- ELBRECHT, V.; BEERMANN, A. J; GOESSLER, G.; NEUMANN, J.; TOLLRIAN, R.; WAGNER, R.; WLECKLIK, A.; PIGGOTT, J. J; MATTHAEI, C. D; LEESE, F. (2016). Multiple-stressor effects on stream invertebrates: a mesocosm experiment manipulating nutrients, fine sediment and flow velocity. **Freshwater Biology**, [s. l.], v. 61, n. 4, p. 362–375. <https://doi.org/10.1111/fwb.12713>.
- GONÇALVES, J.L.M.; ALVARES, C.A.; GONÇALVES, T.D.; MOREIRA, R.M.; MENDES, J.C.T.; GAVA, J.L. (2012). Mapeamento de solos e da produtividade de plantações de Eucalyptus

grandis, com uso de sistema de informação geográfica. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, [s. l.], v. 40, n. 94.

HUNN, J. G.; ORR, J. A.; KELLY, A.-M.; PIGGOTT, J. J.; MATTHAEI, C. D. (2024). Individual and combined impacts of carbon dioxide enrichment, heatwaves, flow velocity variability, and fine sediment deposition on stream invertebrate communities. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 30, n. 5, p. e17336. <https://doi.org/10.1111/gcb.17336>.

MACAULAY, S. J.; JEPPESEN, E.; RIEBESELL, U.; NEJSTGAARD, J. C.; BERGER, S. A.; LEWANDOWSKA, A. M.; RICO, A.; KEFFORD, B. J.; VAD, C. F.; COSTELLO, D. M.; WANG, H.; MADGE PIMENTEL, I.; BARCELOS E RAMOS, J.; GONZÁLEZ, J.; SPILLING, K.; DE SENERPONT DOMIS, L.; BOERSMA, M.; STOCKENREITER, M.; MEERHOFF, M.; VIJVER, M. G.; KELLY-QUINN, M.; BEKLIOĞLU, M.; MATIAS, M. G.; SSWAT, M.; JUVIGNY-KHENAFOU, Noël P. D.; FINK, Patrick; ZHANG, Peiyu; TANIWAKI, R. H.; PTACNIK, R.; LANGENHEDER, S.; NEDERSTIGT, T. A. P.; HORVÁTH, Z.; PIGGOTT, J. J. (2025). Addressing grand ecological challenges in aquatic ecosystems: how can mesocosms be used to advance solutions? **Oikos**, [s. l.], v. 2025, n. 5, p. e11020. <https://doi.org/10.1111/oik.11020>.

MACIEL, M.G.R.; TANIWAKI, R.H.; SAITO, V. S.; MORETTI, M. S.; CAMARGO TELES MIRANDA, P.S.; MORILLA, M.; DA PENHA, L.O.; SARTORI, M.; SOARES ALMEIDA, G.S.; PIGGOTT, J.; SCHNECK, F. (2025). Multiple stressors in tropical streams: nitrate, sediment and flow interactions mediate benthic biomass and diatom community responses in experimental streams. **Inland Waters**, [s. l.], v. 0, n. ja, p. 1–41, [s. d.]. <https://doi.org/10.1080/20442041.2025.2475683>.

PIGGOTT, J. J.; TOWNSEND, C. R.; MATTHAEI, C. D. (2015). Climate warming and agricultural stressors interact to determine stream macroinvertebrate community dynamics. **Global change biology**, [s. l.], v. 21, n. 5, p. 1887–1906.

TANIWAKI, R. H.; PIGGOTT, J. J.; FERRAZ, S. F. B.; MATTHAEI, C. D. (2017). Climate change and multiple stressors in small tropical streams. **Hydrobiologia**, [s. l.], v. 793, n. 1, p. 41–53. <https://doi.org/10.1007/s10750-016-2907-3>.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (Processo # 20/02375-5 e 23/03478-0), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico – CNPq (bolsa produtividade a RHT processo 305987/2025-9), ao Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas da Universidade Federal do ABC, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Financiamento 001).