

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E RECURSOS
NATURAIS

MILENA SARTORI

Efeitos experimentais de estressores múltiplos na composição e estrutura de tamanho de macroinvertebrados bentônicos em clima tropical

SÃO CARLOS – SP

2023

MILENA SARTORI

Efeitos experimentais de estressores múltiplos na composição e estrutura de tamanho de macroinvertebrados bentônicos em clima tropical

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ecologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ecologia e Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Victor Satoru Saito

São Carlos - SP

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Biológicas e da Saúde
Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Milena Sartori, realizada em 17/08/2023.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Victor Satoru Saito (UFSCar)

Prof. Dr. Ricardo Hideo Taniwaki (UFABC)

Prof. Dr. Marcelo da Silva Moretti (UVV)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por sempre ter me dado força para finalizar essa jornada que não foi fácil.

Agradeço a todos os professores que estiveram presentes em minha jornada de graduação e mestrado; se não fosse por vocês não estaria aqui hoje. Um agradecimento especial ao meu orientador, Victor Saito, que durante os anos de mestrado me ensinou lições além de acadêmicas. Um grande amigo, compreensível e muito paciente. Foi um grande fator sua incrível orientação para hoje eu ter uma ótima sensação ao lembrar da minha época de mestrado. Guardarei esses anos com muito carinho. Agradeço também ao professor Gilmar Perbiche que sempre esteve presente nos meus períodos de estudos, sempre me aconselhando e dando as melhores dicas para minha constante evolução.

Agradeço aos meus pais que sempre me apoiaram e fizeram de tudo para hoje eu ter a formação que tenho. Sem eles nada disso seria possível. Agradeço ao meu marido por sempre estar ao meu lado e me ajudar nos momentos de tensões ao longo dessa jornada. Agradeço todos os meus amigos que conheci no projeto ExStream. Passamos pequenos períodos juntos mas, hoje, levo todos eles no meu coração.

Agradeço aos professores presentes na banca por todos os comentários negativos e positivos, que foram cruciais para o meu desenvolvimento na parte escrita. Nessa jornada de 6 anos de estudos, com graduação e mestrado, acabei perdendo três avôs. Dedico esse trabalho à eles, que estiveram presentes na minha infância mas, infelizmente, nesse momento que me orgulho muito não estarão (de forma presencial).

Enfim, agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio no projeto e pela FAPESP – Processo 2020/02375-5.

Resumo

A agricultura aumentou de forma exponencial nos últimos anos, alterando o uso da terra. Entre os estressores relacionados às atividades agrícolas que afetam os ecossistemas lóticos destacam-se a deposição de sedimentos finos, a mudança da vazão e aumento nas concentrações de nutrientes dissolvidos. Além da composição taxonômica, alterações nos espectros de tamanho corporal (relações tamanho-biomassa) podem fornecer informações importantes sobre o funcionamento do ecossistema. Nosso objetivo geral neste trabalho foi associar a estrutura de tamanho e a composição em comunidades bentônicas aos impactos associados à intensificação no uso do solo, como aumento do nitrogênio dissolvido, redução do fluxo de água e sedimentação, em experimentos de mesocosmos simulando riachos (sistema ExStream). Além disso, esperávamos que os impactos múltiplos ocasionassem inclinações negativas e menos acentuadas nos espectros de tamanho com o impacto ambiental, devido à simplificação da rede trófica e presença apenas de organismos resistentes e eficientes que transferem mais energia ao longo da cadeia trófica. Oposto ao esperado, os espectros de tamanho apresentaram uma relação positiva entre abundância e tamanho das espécies, mudando sistematicamente em relação à sedimentação e velocidade da vazão. Em acordo com os resultados da estrutura de tamanho, observamos alterações na composição das comunidades expostas a redução do fluxo de água, sendo que a interação deste estressor com a sedimentação também foi significativa. Esta interação reduziu a abundância de muitos táxons de Chironomidae (Diptera), sendo que os gêneros raros não foram observados neste tratamento. Estes resultados fornecem novos *insights* sobre as respostas que as comunidades de macroinvertebrados podem apresentar frente a diferentes estressores relacionados à agricultura.

Palavras-Chave: *Size Spectra*, biomassa, Sistema ExStream, aumento de nutrientes, redução do fluxo da água, sedimentação

Abstract

Agriculture has increased exponentially in recent years, changing land use. Among the stressors related to agricultural activities that affect lotic ecosystems, the deposition of fine sediments, changes in flow and increased concentrations of hydrating nutrients stand out. In addition to taxonomic composition, changes in body size spectra (size-biomass relationships) can provide important information about ecosystem functioning. Our general objective in this work was to associate the size structure and composition in benthic communities with the impacts associated with intensification in land use, such as increased nitrogen concentration, reduced water flow and sedimentation, in mesocosm experiments simulating streams (system ExStream). Furthermore, we expected that multiple impacts would cause negative and less pronounced slopes in size spectra with environmental impact, due to the simplification of the food network and the presence of only resistant and efficient organisms that transfer more energy along the food chain. Contrary to expectations, size spectra showed a positive relationship between species abundance and size, changing systematically in relation to sedimentation and flow velocity. According to the size structure results, we observed changes in the composition of communities exposed to reduced water flow, and the interaction of this stressor with sedimentation was also significant. This interaction interferes with the abundance of many taxa of Chironomidae (Diptera), and rare genera were not presented in this treatment. These results provide new insights into the responses that macroinvertebrate communities can present to different stressors related to agriculture.

Keywords: Size Spectra, biomass, ExStream System, nutrient increase, water flux reduction, sedimentation

Sumário

<u>1 Introdução</u>	1
<u>2 Métodos</u>	6
<i><u>2.1 Áreas de estudo</u></i>	6
<i><u>2.2 Desenho experimental</u></i>	6
<i><u>2.3 Amostragem de macroinvertebrados bentônicos</u></i>	9
<i><u>2.4 Análise de dados</u></i>	10
<u>3 Resultados</u>	11
<u>4 Discussão</u>	19
<i><u>4.1 Sedimentação e Redução do Fluxo da água</u></i>	20
<i><u>4.2 Nutrientes</u></i>	22
<u>5 Referências</u>	23

1- Introdução

A agricultura aumentou de forma exponencial nos últimos 50 anos, alterando o uso da terra e ocasionando mudanças abruptas nos processos biológicos dos ecossistemas terrestres e aquáticos (MEA, 2005; DE CARVALHO, 2020). Nas microbacias, alterações no uso do solo, que resultam na conversão de vegetações nativas em paisagens agrícolas, alteram os componentes bióticos e abióticos dos ecossistemas lóticos, que são o destino final dos produtos gerados e utilizados em sua área de drenagem (ALLAN, 2004; DUARTE *et al.*, 2018). As mudanças resultantes da expansão de áreas agrícolas raramente operam de forma isolada e seus impactos nos ecossistemas de riachos geralmente refletem uma resposta integrada a vários estressores (TOWNSEND *et al.*, 2008; ORMEROD *et al.*, 2010). Entre os estressores prevalentes decorrentes das atividades agrícolas destacam-se a deposição de sedimentos finos, mudança no fluxo da água e aumento nas concentrações de nutrientes dissolvidos (JORDAN *et al.*, 2007; JARVIE *et al.*, 2010; NHIWATIWA *et al.*, 2017; GONZALES-INCA *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2018; COLLINS *et al.*, 2018).

Os organismos bentônicos são componentes fundamentais em ecossistemas aquáticos, participam intensamente nas atividades de manutenção e regulação dos processos ecossistêmicos, como decomposição de matéria orgânica e ciclagem de nutrientes (NYBAKKEN, 1993; LANA, 1996; BARROS *et al.*, 2012; DE OLIVEIRA GOMES, 2017). Esses organismos são utilizados como indicadores da saúde do ecossistema (WARWICK, 1986; BLANCHET *et al.*, 2008, BESSA *et al.*, 2014, SAITO *et al.*, 2015), pelo fato de estarem situados na interface sedimento-água, serem altamente ricos em espécies e formas de vida, tornando-os assimiladores de mudanças abióticas ocorridas nos diferentes compartimentos dos sistemas (DAUVIN, 1993). Quanto às mudanças bióticas que podem ocorrer, uma delas é a alteração na composição e riqueza taxonômica, afetando a manutenção e funcionamento dos ecossistemas lóticos (SIQUEIRA *et al.*, 2015; SCHIESARI *et al.*, 2023).

O tamanho corporal é uma das características funcionais de maior importância ecológica, determinando uma ampla gama de processos biológicos e

fisiológicos (BROWN *et al.*, 2004, NORRKO *et al.*, 2013). O tamanho corporal pode afetar os processos biológicos em todos os níveis de organização – das células às populações, até o funcionamento dos ecossistemas (DONADI *et al.*, 2015, SAITO, PERKINS & KRATINA, 2021). Em comunidades multitróficas, os espectros de tamanho corporal podem fornecer informações úteis sobre o funcionamento do ecossistema em termos de fluxo de energia (WOODWARD *et al.*, 2005; PERKINS *et al.*, 2018). Organismos maiores precisam de mais energia que organismos menores para manter seu metabolismo e para isso, se alimentam de organismos menores e mais numerosos. Dessa forma, a relação de tamanho e abundância dos organismos pode refletir como a energia está sendo utilizada e transferida na cadeia trófica (BROWN *et al.*, 2004, PERKINS *et al.*, 2018).

O espectro de tamanho é simplesmente a relação da abundância dos organismos e seus tamanhos corpóreos (White *et al.*, 2007). A inclinação dessa relação, aliada a outro parâmetro de regressão linear (intercepto), informa sobre o fluxo energético nos ecossistemas. Inclinações mais baixas podem indicar uma transferência de energia de maneira eficiente, a fim de suportar uma proporção maior de indivíduos maiores, no entanto, inclinações acentuadas indicam uma baixa eficiência na transferência de energia, com menor quantidade de indivíduos grandes sendo suportados pelos organismos menores (BROW *et al.*, 2004; MARTÍNEZ *et al.*, 2016; POMERANZ; WESNER, 2020). Isto nos possibilita utilizar a inclinação do espectro do tamanho como um indicativo da eficiência metabólica de uma comunidade (capacidade de transferir energia e biomassa através dos níveis tróficos). Em gradientes sob intensificação de uso do solo, estudos recentes indicaram que o espectro de tamanho de riachos pode sofrer alterações; no entanto, estes estudos ainda são escassos para entendermos as consequências disso para a estabilidade dos ecossistemas (COLLYER *et al.*, 2023).

Em riachos, modificações do fluxo de água alteram a morfologia do canal e o tipo de substrato, afetando de maneira indireta as comunidades bentônicas e, potencialmente, o fluxo de energia nestes ecossistemas. Isso ocorre devido ao efeito nestas comunidades estar atrelado a heterogeneidade do habitat, que é comumente diminuída com a redução do fluxo de água (CORTES *et al.*, 2002; GRAEBER *et al.*, 2013; WADDLE & HOLMQUIST, 2013). Associado a isso, as características do sedimento controlam as mudanças nas comunidades bentônicas, porque estão

diretamente relacionadas ao conteúdo de matéria orgânica (disponibilidade do alimento), o qual determina a complexidade trófica e, por conseguinte, irá influenciar diretamente na capacidade suporte do sistema (KNOX, 2001).

Os sedimentos inorgânicos encontrados no leito são frequentemente dominados por material fino em riachos, que drenam as bacias agrícolas, sendo este tipo de sedimento inadequado para diversos invertebrados aquáticos (QUINN *et al.*, 1992; JOWETT *et al.*, 1996; MARY & MARMONIER, 2000). O excesso de sedimento pode recobrir os substratos consolidados, como pedras e seixos superficiais, que são microhabitats de extrema importância para as comunidades do perifiton, resultando em redução na heterogeneidade ambiental. Ao se depositar sobre os organismos, o sedimento pode afetar o funcionamento de estruturas respiratórias ou filtradoras de determinados táxons de invertebrados, alterando a sua distribuição (WOOD & ARMITAGE, 1997; JONES *et al.*, 2012). Com isto, acaba conduzindo uma homogeneização dos habitats do leito do rio, com alto potencial de entupimento do leito do rio (HALL *et al.*, 2001), o que ocasiona uma redução na densidade e diversidade da maioria dos invertebrados (QUINN *et al.*, 1992) especialmente para invertebrados que vivem dentro de interstícios sedimentares (BOULTON *et al.*, 1998; BRUNKE, 1999; HANCOCK, 2002).

O aumento de nutrientes na água pode ocasionar uma elevação na produção autóctone e, por consequência, um crescimento na biomassa de produtores primários. Em sistemas com aumento de nutrientes, a produção de matéria orgânica pode ultrapassar as taxas de consumo e levar a um aumento nas taxas de decomposição. Por ser um processo oxidativo, o aumento nas taxas de decomposição pode resultar na redução nos teores de oxigênio disponível na camada superficial do sedimento, alterando assim a composição taxonômica das comunidades bentônicas (SAVAGE *et al.*, 2002; BARR *et al.*, 2020). Desta forma, a biomassa de alguns grupos pode aumentar devido às maiores taxas de produção primária e consequente aumento da disponibilidade de alimento para consumidores. Por outro lado, o enriquecimento de nutrientes pode ter efeitos negativos em outros grupos, pois quando a biomassa de algas prolifera, os níveis de oxigênio dissolvido diminuem e as comunidades tornam-se dominadas por espécies tolerantes a condições eutróficas (NIYOGI *et al.*, 2007; WAGENHOFF *et al.*, 2011).

Normalmente, os impactos da sedimentação, redução do fluxo de água e do aumento de nutrientes em ecossistemas lóticos são avaliados individualmente e em condições pouco controladas, gerando inferências de causa e efeito frágeis. Além disso, na natureza os estressores são múltiplos e ocorrem de maneira integrada. Visando compreender melhor os efeitos do uso do solo nas comunidades de macroinvertebrados encontrados em microbacias agrícolas, este estudo avaliou os efeitos individuais e combinados de três estressores recorrentes, i.e., aumento da sedimentação, redução do fluxo de água, e aumento de nutrientes, na composição taxonômica e nas relações de tamanho e abundância de organismos bentônicos (*size spectra*).

Hipotetizamos que os estressores provenientes das atividades agrícolas iriam afetar as comunidades de macroinvertebrados, resultando em uma mudança na estrutura de tamanho no ecossistema. Por afetar diretamente tanto o habitat quanto os organismos bentônicos, esperávamos que o aumento da sedimentação seria o estressor que mais ocasionasse mudanças no funcionamento dos ecossistemas, ocasionando em perdas de espécies e mudanças nos parâmetros do *size spectra*. Especificamente, esperávamos que o aumento de nutrientes resultasse na maior abundância de consumidores primários nas comunidades de macroinvertebrados, resultando em equações da reta com maiores interceptos nos modelos de espectro de tamanho devido à maior abundância de organismos menores (Figura 1). Além disso, esperávamos que os impactos múltiplos ocasionassem inclinações menores com o impacto ambiental, devido à simplificação da rede trófica e presença apenas de organismos resistentes e eficientes que transferem mais energia ao longo da cadeia trófica (COLLYER *et al.*, 2023) (Figura 1). Dessa forma, nosso objetivo geral neste trabalho foi associar a estrutura de tamanho e a composição em comunidades bentônicas aos impactos associados à intensificação no uso do solo, como aumento do nitrogênio, redução do fluxo de água e sedimentação em experimentos de mesocosmos simulando riachos.

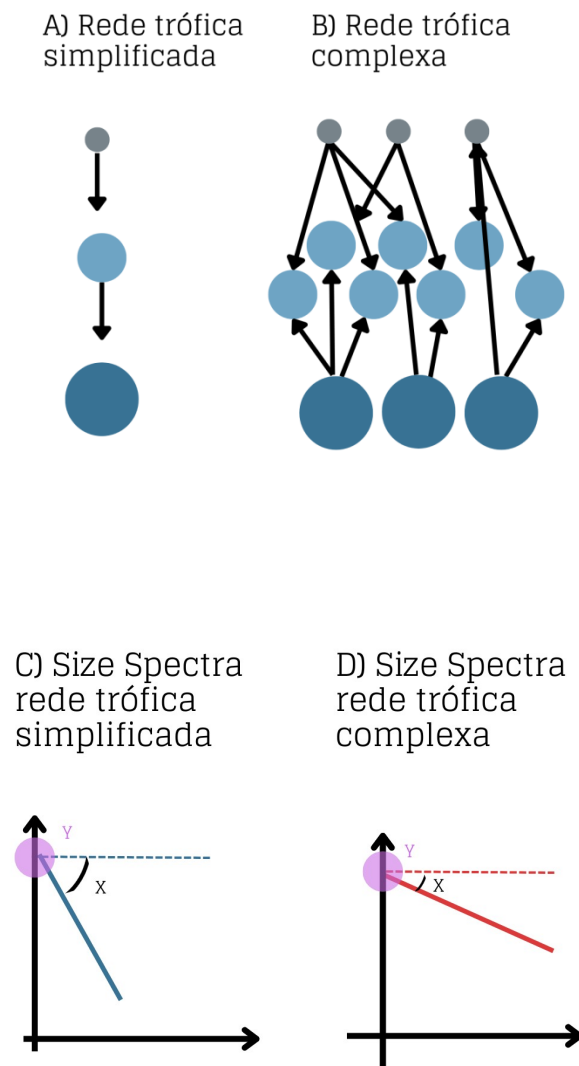


Figura 1. Exemplo da simplificação da rede trófica que ocorreu em nosso experimento, deixando apenas de organismos resistentes e eficientes que acabam por transferir mais energia ao longo da cadeia trófica. Representação do espectro de tamanho (linha vermelha). O intercepto (Y) indica a quantidade de energia disponível no sistema (pequenos organismos na base da teia alimentar). A inclinação (X) indica a eficiência energética do ecossistema, pois alta eficiência implica na manutenção de maiores organismos sendo sustentados em maior biomassa. O eixo x representa log (abundância) e o eixo y representa log (densidade).

2- Métodos

2.1 Área de estudo

Este estudo foi realizado na Estação Experimental de Ciências Florestais da ESALQ/USP em Itatinga, SP (23°38'01" e 23°02'30" S - 48°38'34" e 48°37'30" W), que possui altitude média de 830 m. A microbacia onde o experimento foi montado faz parte do Baixo do Paranapanema, que pertence a 4° região hidrográfica do Estado de São Paulo, com área de cerca de 26.254 km² e vazão média de 243 m³/s (BEZERRIL Jr, 1990). De acordo com STRAHLER (1964) a bacia estudada é de segunda ordem e apresenta padrão de drenagem subdentrítico. De acordo com a classificação de Koppen, o clima desta região é caracterizado como Cwa, com invernos secos e verões quentes. A temperatura média nos meses mais frios é de 12,8° C e a média anual de temperatura é de 19,4° C. A precipitação anual média é de 1635 mm.

A Estação Experimental de Ciências Florestais possui uma área com cerca de 2119,6 ha. Sua topografia é caracterizada como suavemente ondulada. Os solos predominantes são latossolos e podzólicos. A cobertura vegetal predominante na reserva é de *Eucalyptus* e *Pinus*, os quais são utilizados para experimentos e comércio. Alguns trechos com vegetação nativa estão presentes, incluindo a mata ripária do riacho utilizado neste estudo (GONÇALVES, 2003).

2.2 Desenho experimental

O experimento no sistema ExStream foi iniciado no dia 12 de janeiro de 2022 e teve duração de 5 semanas. Este sistema de mesocosmos permitiu a manipulação dos três estressores escolhidos (aumento da sedimentação, redução no fluxo de água e aumento de nutrientes dissolvidos) em um desenho fatorial completo. Foram utilizados 80 mesocosmos com formato circular, com diâmetro externo com cerca de 25 cm e volume total de 3,5 L (PIGGOTT *et al.*, 2016). Uma bomba de sucção da água foi instalada próxima ao sistema para direcionar água e organismos do riacho de forma contínua para os cinco tanques superiores que distribuíam a água para todo os mesocosmos (Figura 2).

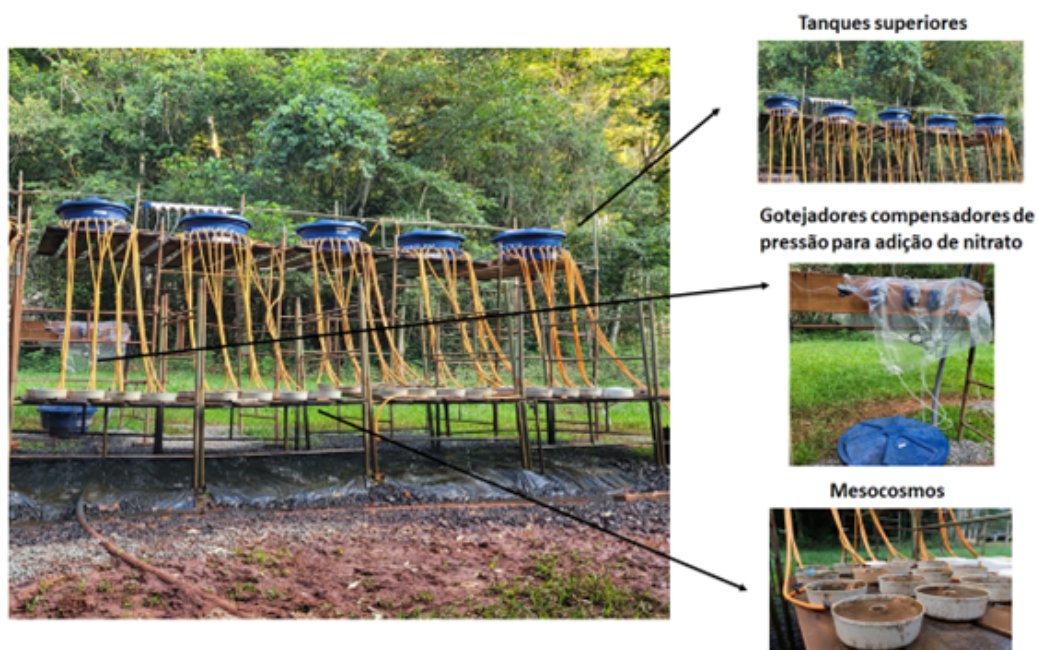


Figura 2. Fotos da estrutura do Sistema ExStream localizado na Estação Experimental ESALQ-USP em Itatinga (SP).

Em relação à adição de nutrientes, foram utilizados quatro níveis (concentrações) de nitrato: a concentração natural do ambiente e concentração de 30%, 60% e 90% acima do valor da concentração natural do riacho. O nitrato que utilizamos foi o KNO_3 (YaraTera™ Krista™ K, contendo 13% de nitrogênio N solúvel em água, 43% de potássio K_2O solúvel em água e 1% de magnésio Mg, solúvel em água), que foi dissolvido na água a partir de uma solução de 50g/100L. A solução foi adicionada aos mesocosmos dos respectivos tratamentos por meio de gotejamento por compensadores de pressão, que foram acoplados de forma individual em diferentes pressões para atingir a concentração de cada tratamento. As concentrações de nitrato foram mensuradas diariamente em um espectrofotômetro de luz durante o decorrer do experimento, no período da manhã e da tarde, em um mesocosmos de cada tratamento escolhido de forma aleatória. As concentrações de nitrato utilizadas foram baseadas a partir do estudo de TANIWAKI *et al.* (2019) que observou concentrações de nitrato em riachos sob influência da cana-de-açúcar cerca de cinco vezes maiores do que riachos que drenam regiões de pasto e oito vezes maiores do que em trechos florestados de cabeceira.

Foram utilizados dois níveis de deposição de sedimento: sem adição de sedimento e 80% de preenchimento nos mesocosmos (400g areia fina que foram

depositados em cada mesocosmos no primeiro dia de experimento). Para o preenchimento foi utilizada a areia fina com tamanho de grão médio de 0,2 mm. Esta porcentagem de preenchimento foi baseada em um estudo que analisou 86 riachos que drenam diferentes bacias hidrográficas do estado de São Paulo (MOLINA *et al.*, 2017). Em relação ao fluxo de água, foram utilizadas duas velocidades: a velocidade normal do riacho estudado (1,5 L/m) e reduzida (0,5 L/m). A velocidade da água no sistema foi medida diariamente nos períodos da manhã e da tarde.

Os tratamentos dos estressores sedimentação e fluxo de água foram espacialmente aleatorizados nos blocos que representavam os quatro níveis de nitrato, com quatro réplicas de cada tratamento e um bloco controle (sem nenhuma adição de estressores) (Figura 3).

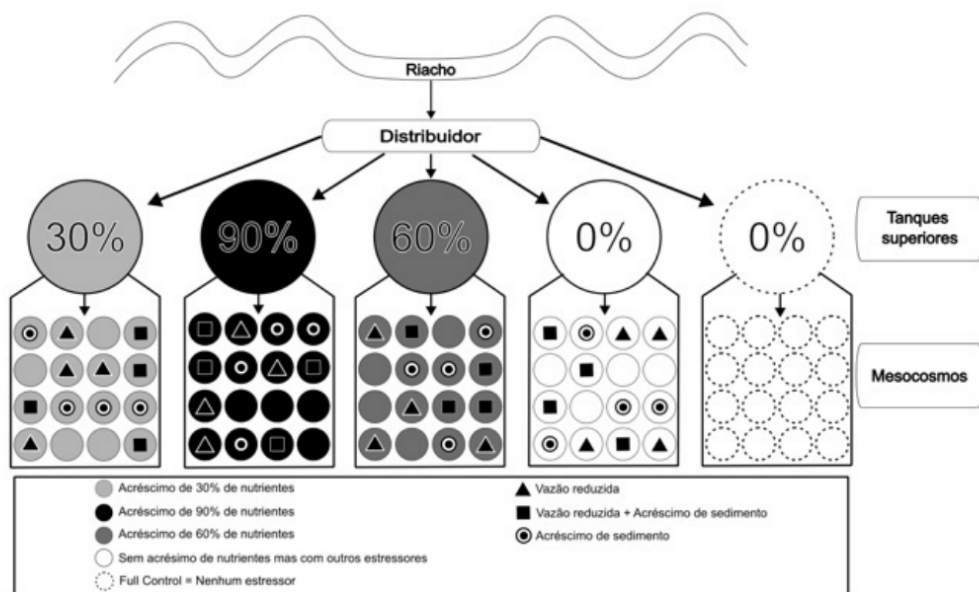


Figura 3. A estrutura do ExStream foi configurada em 5 blocos (A, B, C, D e E). Cada bloco possuía uma concentração de nutrientes ou era o controle. Os Blocos A, B e D tinham, respectivamente, 30%, 90% e 60% a mais a concentração normal de nitrato do ambiente. O Bloco C não recebeu adição de nutrientes. O Bloco E foi utilizado como controle. Os círculos representam os mesocosmos, os círculos com bordas espessas representam os mesocosmos onde foi adicionado sedimento e os círculos com uma linha no centro representam os mesocosmos com redução do fluxo da água.

No primeiro dia após a montagem da estrutura, os mesocosmos foram preenchidos com substrato seco, composto por 500 mL de cascalho de 2 a 20 mm e

pedras de superfície de 20 mm, a fim de simular o leito de pequenos riachos. Em seguida, a bomba foi ligada e o fluxo de água iniciado nos mesocosmos.

O experimento só foi iniciado após um período de 15 dias, para que ocorresse a colonização natural dos mesocosmos por organismos aquáticos. Com o intuito de acelerar a colonização por macroinvertebrados, foram adicionados indivíduos das ordens Plecoptera, Hemiptera, Diptera, Coleoptera, Trichoptera e Ephemeroptera, de forma homogênea entre os mesocosmos. Os organismos foram coletados em riachos adjacentes ao experimento, transportados em recipientes plásticos contendo água dos próprios riachos.

O experimento iniciou com o início da adição da solução de nitrato, que foi constante durante 21 dias. A adição de sedimento e a redução do fluxo de água também foram iniciadas no mesmo dia nos respectivos mesocosmos e permaneceram durante os 21 dias do experimento.

2.3 Amostragem dos macroinvertebrados bentônicos

No último dia de experimento, após o desligamento do sistema, foi realizada a lavagem de todo o material contido nos mesocosmos, em água corrente, sob peneira com abertura de malha de 250 μ m. Após a lavagem, o material retido na peneira (amostras) foi transferido para recipientes plásticos e armazenadas em etanol 70%. Posteriormente, todas as amostras foram triadas e os macroinvertebrados encontrados foram contados e identificados ao menor nível taxonômico possível (TRIVINHO-STRIXINO, 2007; TRIVINHO-STRIXINO, 2011;). Para a identificação dos gêneros de Chironomidae (Diptera), foram montadas lâminas permanentes em Hoyer para observação das larvas em microscópio (Aumento De 40 a 400X). Todos os organismos encontrados tiveram suas dimensões corpóreas determinadas sob estereomicroscópio e papel milimetrado, de acordo com o grupo taxonômico (COLLYER *et al.*, 2023). A partir das medidas corpóreas, foi estimada a biomassa individual a partir de equações comprimento-biomassa compiladas da literatura por COLLYER *et al.* (2023) (Tabela 1).

Tabela I. Dimensões corporais que foram determinados para cada táxon encontrado para estimativa da biomassa e elaboração do espectro de tamanho.

Taxa	Abreviação	Dimensão corporal
Ostracoda	TBL	Comprimento Corpo
Ceratopogonidae	TBL	Comprimento Corpo
Chironominae	HW	Largura Cabeça
Coleoptera	TBL	Comprimento Corpo
Elmidae	HW	Largura Cabeça
Zygoptera	HW	Largura Cabeça
Trichoptera	TBL	Comprimento Corpo

2.4 Análise dos Dados

Calculamos a riqueza taxonômica e a abundância total para cada mesocosmo (amostra) como o número total de táxons e a soma de todos os organismos encontrados, respectivamente. Construímos Modelo Lineares Generalizados para associar os valores de riqueza e abundância com os tratamentos do experimento. A significância dos modelos globais foi testada utilizando testes de Chi-quadrado e os efeitos puros e interativos foram testados por meio de comparações de médias marginais (EMM) (LENTH & LENTH, 2018).

Utilizamos um método de escalonamento multidimensional não-métrico (NMDS) utilizando a dissimilaridade de Bray-Curtis para examinar os padrões das variações na composição dos macroinvertebrados entre os diferentes tratamentos. Com o intuito de testar estatisticamente estes efeitos, utilizamos uma análise de variância multivariada permutacional (PERMANOVA) com a composição dos macroinvertebrados para aferir mudanças decorrentes dos tratamentos, utilizando o índice de dissimilaridade de Bray-Curtis. Utilizamos o valor de F calculado e então comparamos com os tratamentos e testamos quanto à sua significância. O nível de significância que utilizamos foi de 0,05. Finalizamos a exploração dos efeitos na composição utilizando uma análise SIMPER para identificar as espécies que foram

afetadas pelos tratamentos que tiveram efeitos significativos na PERMANOVA e também observar a abundância relativa destes gêneros.

Para estimar o espectro de tamanho utilizamos a abordagem 'size density', que relaciona a soma das abundâncias das espécies (dados logaritmizados eixo Y) e biomassa média individual de cada espécie (dados logaritmizados, eixo X) (WHITE *et al.*, 2007). Esta abordagem utiliza a identidade das espécies na estruturação de tamanho e, portanto, é apropriada para estudos com foco na estruturação taxonômica e de tamanho de forma concomitante. Primeiramente estimamos o 'global size density' com todos os organismos do experimento e utilizamos uma regressão linear para identificar a relação geral entre tamanho das espécies e suas abundâncias. Em seguida, analisamos o efeito dos tratamentos no espectro de tamanho local com um modelo múltiplo:

$$\log(n) \sim \log(\text{biomassa} + 1) * (\text{nut} * \text{sed} * \text{vel}) \text{ (eq 1)}$$

onde a abundância foi a variável resposta, tendo como variáveis explicativas o tamanho médio das espécies, os tratamentos e as interações entre eles.

Todas as análises foram realizadas no ambiente R, utilizando os pacotes *vegan*, *sizeSpectra* e *car* (FOX *et al.*, 2007; OKSANEN *et al.*, 2010; SCOTT *et al.*, 2014).

3- Resultados

Um total de 80 mesocosmos foi amostrado, onde foram encontrados um total de 2.093 indivíduos (26 ± 11 , média \pm DP). Os indivíduos foram identificados em diferentes resoluções taxonômicas, sendo 1 no nível de Classe, 3 em nível de Ordem, 3 no nível de Família, 2 no nível de Subfamília, 3 no nível de Tribo e 41 no nível de Gênero. Os cinco taxa com maiores abundâncias relativas foram *Pentaneura* (Chironomidae, Diptera, 23%), Ostracoda (16%), Ceratopogonidae (Diptera, 8%), *Polypedilum* (Chironomidae, Diptera, 8%) e *Paratanytarsus* (Chironomidae, Diptera, 6%). Notavelmente, muitos grupos inseridos de forma deliberada no início do experimento não foram encontrados ao final, com a ausência completa de Ephemeroptera, Plecoptera e Trichoptera, por exemplo.

A GLM considerando riqueza como variável resposta indicou um modelo global significativo (Chi-Quadrado, valor de $P=0.002$), sendo que nas comparações de médias marginais apenas a comparação da riqueza em mesocosmos de baixo fluxo e com 30% de adição de nutrientes tiveram diferenças entre aquelas com e sem sedimentação (razão $Z=3.41$, $P=0.001$). Porém é possível observar a tendência de maior riqueza para mesocosmos sem adição de sedimentação (Figura 4). Para a GLM considerando a abundância como variável resposta, também obtivemos um modelo global significativo (Chi-Quadrado, valor de $P<0.001$), sendo que observamos seis comparações pareadas com diferenças significativas (Tabela II). De modo geral, observamos abundâncias maiores sem sedimentação (Figura 4).

Tabela II. Comparações de médias marginais que foram significativas ($P<0.05$) a partir do modelo linear generalizado comparando os valores de abundância total dos mesocosmos em relação aos tratamentos do experimento.

sedimento	velocidade	nutrientes	contraste		Razão Z	valor de P	
Normal	baixa	.	nutrientes90	-	nutrientes60	-4.069	0.0012
.	baixa	30	Normal	-	Aumento	5.720	<.0001
.	Normal	60	Normal	-	Aumento	7.591	<.0001
.	Normal	90	Normal	-	Aumento	3.874	0.0027
Aumento	.	0	Normal	-	baixa	4.130	0.0008
Normal	.	90	Normal	-	baixa	3.766	0.0043

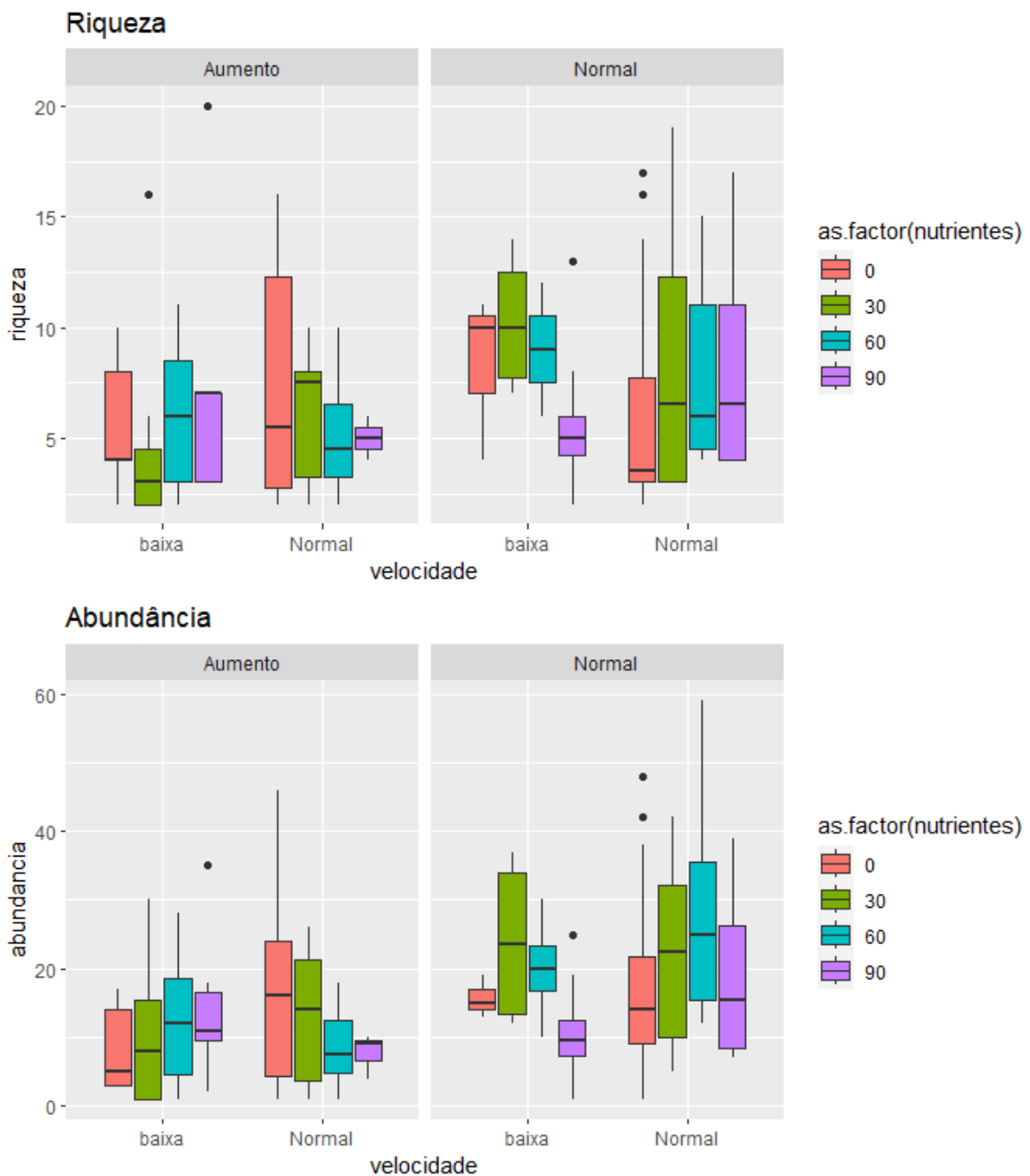


Figura 4. Gráficos de caixa indicando os valores de riqueza e abundância dos mesocosmos para os diferentes tratamentos do experimento. Os códigos 'Aumento' e 'Normal' indicam as comparações entre níveis de sedimentação. Os códigos abaixo dos gráficos com as indicações 'baixa' e 'Normal' indicam os níveis de velocidade da água.

A análise NMDS (stress = 0.14; Figura 5) permitiu visualizar sobreposições elevadas das composições das comunidades em todos os tratamentos dos estressores. O primeiro eixo da NMDS separou as comunidades em dois grupos, porém sem clara estruturação nos tratamentos do experimento. Houve uma

tendência em separar as comunidades positivamente associadas ao predador Ceratopogonidae (Diptera) e negativamente associadas a diversos Chironomidae das outras comunidades. No entanto, a PERMANOVA realizada diferenciou as comunidades quanto ao fluxo de água ($F = 0.022$, $R^2 = 0.020$) e à interação entre fluxo de água e sedimento ($F = 0.040$, $R^2 = 0.020$), apesar do baixo poder explicativo. Isso significa que a composição das espécies variou, em parte, em relação à velocidade da água e também com o nível de sedimentação, sendo este último dependente da velocidade (interação dos fatores).

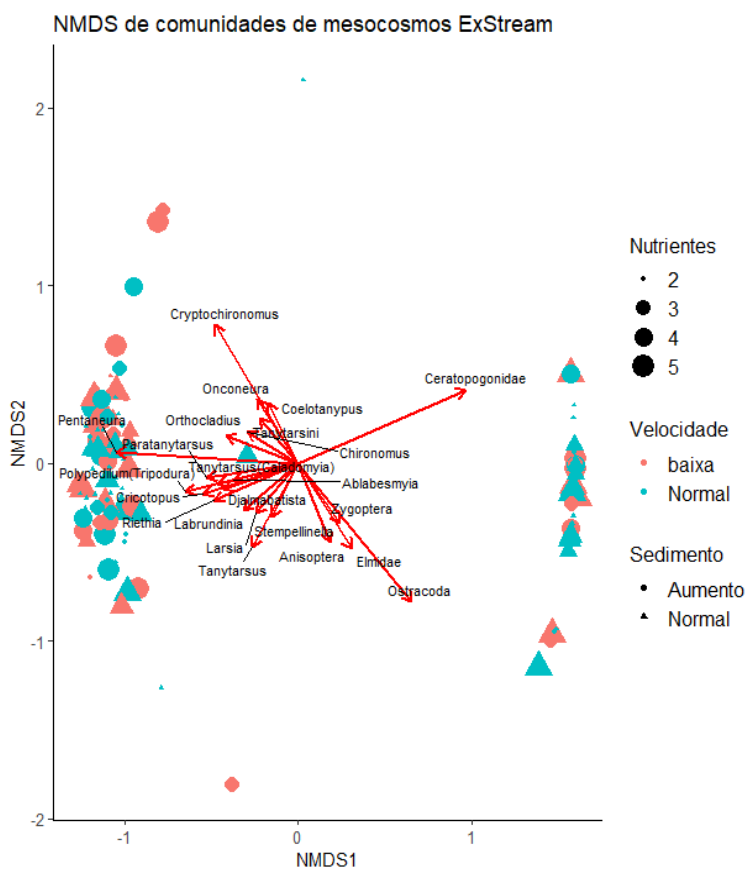


Figura 5. Representação do NMDS utilizando o índice de dissimilaridade de Bray-Curtis, onde as cores indicam as diferenças de velocidade, os símbolos indicam as diferenças de sedimentação e o tamanho dos símbolos indicam todos os níveis de nutrientes. Os autovalores das espécies são indicados pelas setas em vermelho.

A SIMPER foi elaborada de acordo com os resultados significativos do teste anterior (PERMANOVA), dessa forma testando quais espécies foram afetadas pelo tratamento fluxo de água e pela interação entre fluxo de água e sedimento. A Tabela

III apresenta os gêneros que responderam ao tratamento fluxo de água. Os gêneros *Cryptochironomus* e *Labrundinia* tiveram maior abundância no fluxo de água normal. No entanto, o gênero *Chironomus* foi mais abundante no fluxo de água reduzido. É possível observar que apesar dos efeitos significativos, as diferenças absolutas são pequenas.

Tabela III. Táxons que apresentaram variação da sua abundância em relação ao fluxo de água na análise SIMPER. Normal (1,5 m/s) e reduzida (0,5 m/s).

Espécies	Valor de P	Abundância Fluxo normal	Abundância Fluxo Reduzido
<i>Cryptochironomus</i>	0.017	44	34
<i>Chironomus</i>	0.044	9	13
<i>Labrundinia</i>	0.014	5	2

Não foram observadas diferenças nas abundâncias dos táxons na análise SIMPER realizada para o fluxo normal de água e dois níveis de sedimentos. No entanto, foram observadas diferenças para o fluxo de água reduzido. A Tabela IV mostra quais táxons responderam à sedimentação sob fluxo de água reduzido. Todos os táxons tiveram maior abundância nos tratamentos sem o aumento da sedimentação, sugerindo que o aumento de sedimento diminui a abundância desses táxons. Além disso, diversos gêneros raros (singletons) foram encontrados somente nos tratamentos sem o aumento da sedimentação.

Tabela IV. Táxons que apresentaram variação da sua abundância em relação a adição de sedimento sob fluxo de água reduzido (0,5 m/s) na análise SIMPER.

Espécies	Valor de P	Abundância Sedimentação Normal	Abundância Sedimentação Aumentada
<i>Pentaneura</i>	0.009	104	69
<i>Polypedilum</i>	0.007	12	1
<i>Larsia</i>	0.046	11	3
<i>Coelotanypus</i>	0.012	8	1
<i>Parapentaneura</i>	0.007	6	0
<i>Corynoneura</i>	0.007	2	0
Zygoptera	0.005	1	0
<i>Endotribelos</i>	0.009	2	0
<i>Paracladius</i>	0.017	2	0
<i>Thienemanniella</i>	0.017	2	0
Coleoptera	0.004	1	0
<i>Tanypus</i>	0.010	1	0
<i>Clinotanypus</i>	0.015	1	0
<i>Paramerina</i>	0.015	1	0
<i>Tanytarsini</i>	0.015	1	0

<i>Demicryptochironomus</i>	0.007	1	0
<i>Metriocnemus</i>	0.010	1	0
<i>Pseudochironomus</i>	0.017	1	0
Chironomini	0.018	1	0
<i>Dicrotendipes</i>	0.018	1	0
<i>Orthocladinae</i>	0.016	1	0
<i>Procladius</i>	0.001	2	0
<i>Tanytarsus(Caladomyi)</i>	0.001	6	0

A partir dos dados de biomassa individual estimados pelas equações alométricas, obtivemos os táxons com o maior tamanho médio (Figura 6): Coleoptera, Ostracoda e Zygoptera. Destes, Ostracoda também foi o segundo mais abundante no experimento. Os táxons com o menor tamanho médio foram: *Zavrelia*, *Corynoneura*, Orthocladiinae, os quais correspondem a três grupos de Chironomidae. De modo geral, o experimento foi composto por gêneros de Chironomidae de pequeno tamanho corpóreo.

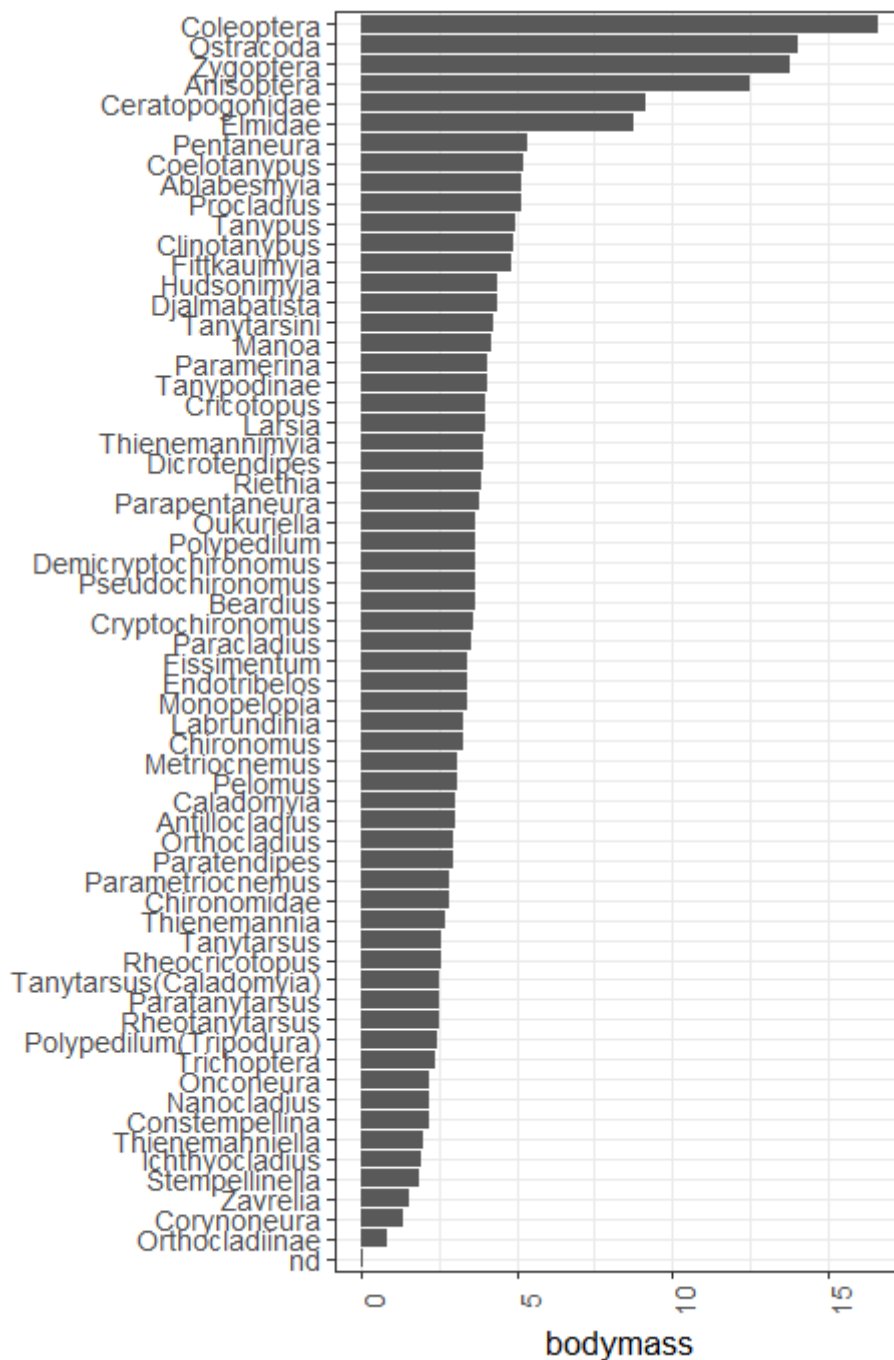


Figura 6. Biomassa média em $\log(\text{mg} \times 10^{-8})$ dos táxons identificados. Os valores foram estimados por equações alométricas a partir das dimensões corporais medidas.

O espectro de tamanho geral utilizando o método 'global size density', determinado a partir da soma de todos os organismos do experimento, não apresentou o padrão esperado, i.e., não foi observada uma relação linear negativa entre $\log(\text{abundância})$ no eixo X e $\log(\text{biomassa})$ no eixo Y (Figura 7). Muitos organismos grandes, como Ostracoda, foram abundantes e muitos organismos

pequenos foram raros. Quando observamos o 'size density' na escala de mesocosmos podemos notar que as inclinações foram sistematicamente positivas para os diferentes tratamentos, indicando que táxons maiores tenderam a ser mais abundantes que táxons menores (Figura 7 e ver material suplementar para os size density de cada mesocosmo). O modelo múltiplo associando o size density local com os estressores indicou um modelo significativo (R^2 marginal=0.18, $P<0.001$). Os termos significativos indicam a importância da sedimentação para os espectros de tamanho e também da interação entre a sedimentação e os outros estressores (Tabela IV). O padrão apresentado é complexo, porém é possível notar alguns efeitos: 1) a baixa velocidade da água associada a organismos menores; 2) pouco efeito dos nutrientes nas estruturas de tamanho; 3) Ostracoda com importância na inclinação do espectro de tamanho nas comunidades que está presente; 4) espectro de tamanho com pouca amplitude de modo geral.

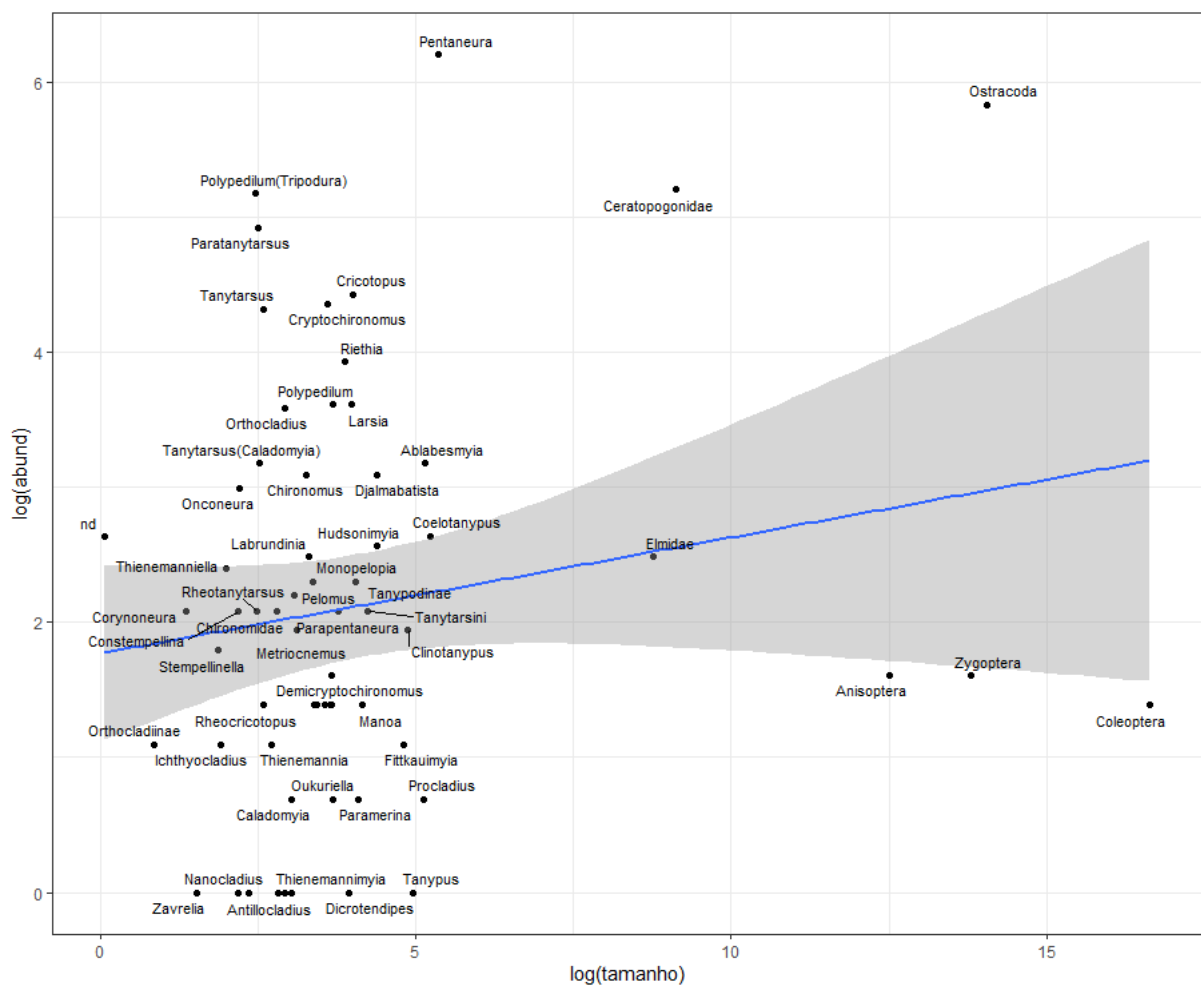


Figura 7. Relação de abundância-tamanho determinada a partir da soma de todos os indivíduos encontrados no experimento (espectro de tamanho geral, 'global size density'). O eixo Y representa a abundância e o eixo X representa o tamanho corporal médio das espécies em $\log(\text{mg} \times - 8)$. A linha de tendência indica o modelo linear com inclinação não significativa.

Tabela IV. Resultados do modelo múltiplo associando a abundância dos organismos como variável resposta em relação à biomassa das espécies e a interação entre os três estressores.

	t value	P value	
Intercepto	3.491	0,00	
log(biomassa)	2.077	0,04	*
nutrientes	0.061	0,95	
sedimento	-1.051	0,29	
velocidade	1.081	0,28	
log(biomassa):nutrientes	0.850	0,40	
log(biomassa):sedimento	4.401	0,00	***
nutrientes:sedimento	1.394	0,16	
log(biomassa):velocidade	-0.476	0,63	
nutrientes:velocidade	-0.590	0,56	
sedimento:velocidade	1.602	0,11	
log(biomassa):nutrientes:sedimento	-4.402	0,00	***
log(biomassa):nutrientes:velocidade	-1.285	0,20	
log(biomassa):sedimento:velocidade	-4.401	0,00	***
nutrientes:sedimento:velocidade	-0.930	0,35	
log(biomassa):nutrientes:sedimento:velocidade	4.402	0,00	***

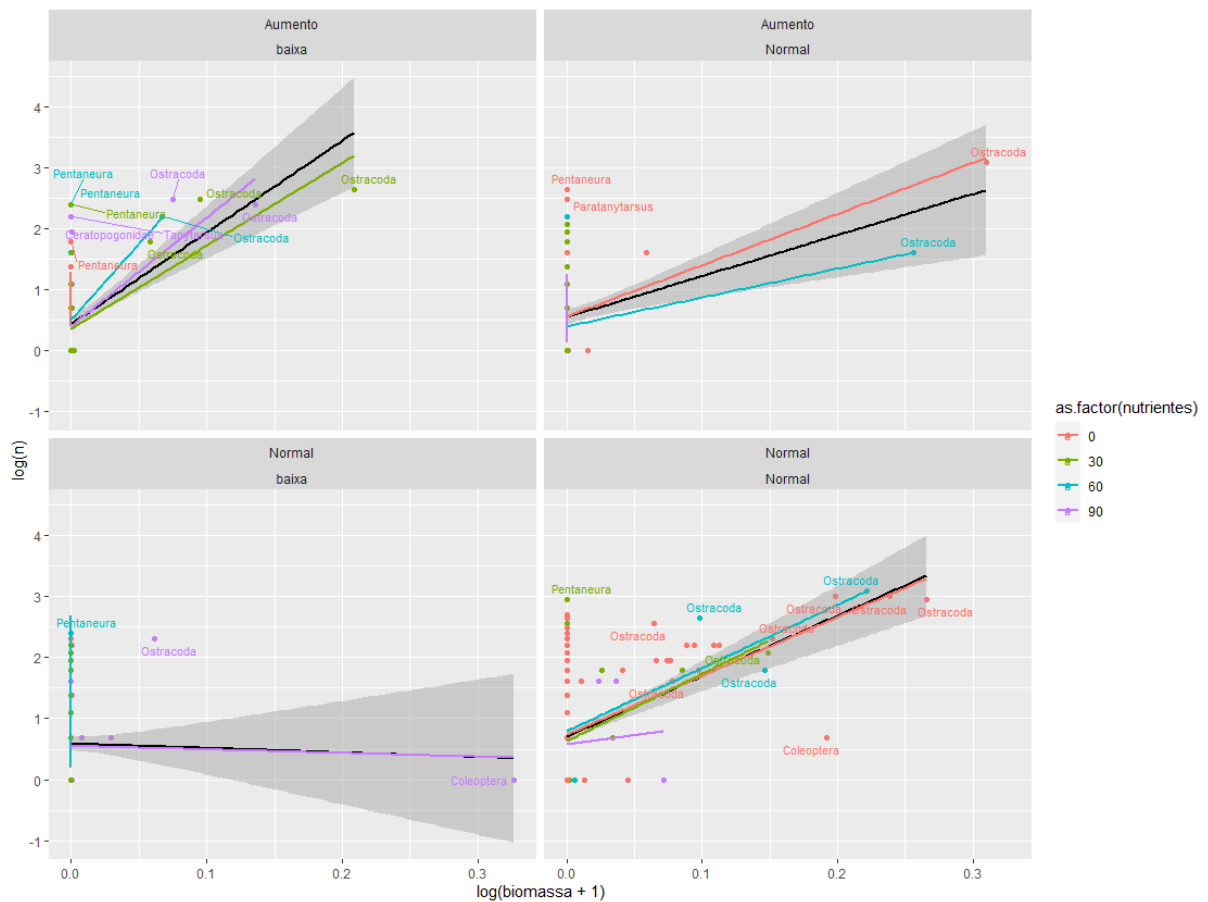


Figura 8. Relação de abundância-tamanho determinada a partir da soma de todos os indivíduos encontrados em cada tratamento (espectro de tamanho). O eixo X representa a biomassa e o eixo Y representa o tamanho corporal médio das espécies log(mg).

4- Discussão

De maneira geral os resultados obtidos em nosso trabalho indicam que os macroinvertebrados tiveram maiores tamanhos, riquezas e abundância nos tratamentos sem o aumento da sedimentação e sem diminuição do fluxo da água, sugerindo que os impactos combinados destes estressores acabam alterando essas comunidades biológicas. Os espectros de tamanho foram sistematicamente opostos ao esperado, com inclinações positivas, indicando que organismos maiores foram mais abundantes que organismos menores. Esses espectros de tamanho responderam de forma complexa aos tratamentos, com organismos maiores menos abundantes com baixa velocidade da água. O efeito interativo entre o fluxo de água reduzido e a sedimentação favoreceu a abundância de Ostracoda, mas diminuiu a

abundância de muitos gêneros de Chironomidae e inibiu a colonização de alguns gêneros sensíveis a perturbações ambientais. Nos próximos parágrafos iremos discutir como essas diferenças podem ser decorrentes de particularidades de comunidades aquáticas tropicais e quais as consequências para o funcionamento das mesmas frente à múltiplos estressores.

Neste estudo observamos uma estrutura de tamanho sistemática em todos os mesocosmos, com espécies maiores sendo mais abundantes que espécies menores. O fato de termos encontrado táxons de menor tamanho, sendo a maioria composta por larvas de Chironominae, provavelmente diminuiu a possibilidade da resposta trófica esperada no espectro de tamanho (muitas espécies pequenas sustentando poucas espécies grandes). Mesmo nos mesocosmos utilizados como controle não foram encontrados muitos táxons de maior tamanho, como predadores e outros grupos sensíveis às mudanças. COLLYER (2023), estudando comunidades de macroinvertebrados em ecossistemas tropicais preservados, observou diversos táxons de tamanhos maiores, como vários gêneros de Trichoptera, Plecoptera, Odonata e Megaloptera. Isto possibilitou a observação de variações do espectro de tamanho ao longo do gradiente de estudo. No entanto, nos mesocosmos do sistema ExStream, mesmo as comunidades do tratamento controle foram dominadas por táxons relativamente resistentes e isso resultou no espectro de tamanho sistematicamente invertido neste experimento.

Um grupo que contribuiu bastante para o padrão na estrutura de tamanho entre múltiplos tratamentos foi o grupo dos Ostracoda. Em nosso experimento houve uma assimetria na abundância de Ostracoda, pois foram mais abundantes do que o esperado conforme o seu tamanho corpóreo, padrão presente mesmo nos mesocosmos controle. Isso se explica pelo fato dos Ostracoda serem filtradores e os mesocosmos de modo geral continham muita matéria orgânica, estes acabaram se beneficiando com isto. Provavelmente, o desvio da equivalência energética no size spectra local, ocorreu por conta dos vieses na aquisição de recursos que podem ser impulsionados por assimetrias de tamanho na competição (espécies maiores competem pelos mesmos recursos que as espécies menores, mas são mais eficientes) ou pode resultar de diferenças na disponibilidade de recursos para espécies de tamanhos diferentes (os recursos disponíveis para espécies maiores eram mais abundantes) (WHITE, 2017).

4.1 Sedimentação e Redução do fluxo de água

O aumento de sedimentos ocasionou a diminuição dos valores de abundância e riqueza total das comunidades de macroinvertebrados. Essa resposta provavelmente se deve à homogeneização do habitat (PETSCH *et al.*, 2017) e à diminuição da disponibilidade de recursos alimentares (MATTHAEI *et al.*, 2010). A redução do fluxo de água foi o segundo estressor mais difundido e afetou várias métricas da comunidade e também os valores de abundância. Nossa primeira hipótese previa que o aumento da sedimentação teria o efeito mais difundido nas comunidades, uma vez que este estressor reduz a heterogeneidade do habitat, afetando o aparelho respiratório, e reduzindo a eficiência alimentar de alguns táxons, ocasionando menores eficiências energéticas em toda a comunidade (WOOD & ARMITAGE, 1997; JONES *et al.*, 2012). De maneira isolada, esse tratamento não causou o efeito esperado. Entretanto, a combinação da sedimentação e redução do fluxo de água apresentou um efeito claro nas comunidades.

Nos mesocosmos com sedimentação, 23 taxa responderam à variação do fluxo da água, sendo que todos foram mais abundantes ou presentes apenas com fluxo de água normal (não reduzido). Dentre as espécies presentes no tratamento com fluxo de água reduzido e sedimentação foram encontrados *Pentaneura*, *Polypedilum*, *Larsia* e *Coelotanypus*. Táxons sensíveis, como *Dicrotendipes* e *Endotribelos* que são exclusivos de áreas florestadas, não foram encontrados neste tratamento. Normalmente, as larvas de *Pentaneura* são encontradas em córregos de baixa ordem ou em associação com macrófitas aquáticas em pequenas lagoas (TRIVINHO-STRIXINO, 2011). O gênero *Polypedilum* é um gênero numeroso em espécies presentes em quase todos os habitats aquáticos continentais (TRIVINHO-STRIXINO, 2011), principalmente associados ao sedimento e plantas aquáticas (ANDERSEN *et al.*, 2015). O gênero *Larsia* também é muito comum, podendo ser encontrado em todos os tipos de ambientes lênticos e lóticos, bem como associado ao sedimento (TRIVINHO-STRIXINO, 2011). As larvas de *Coelotanypus* são relativamente comuns em sedimentos rasos de lagoas, lagos e represas. Desta forma, todos os quatro gêneros encontrados neste tratamento são normalmente encontrados associados ao sedimento. Foi observada uma relação da

maioria dos organismos com o fluxo de água e a quantidade de sedimento. No entanto, a sedimentação demonstrou ser o melhor preditor da composição das comunidades, pois o fluxo de água pode carrear os sedimentos de forma que os organismos não tenham um substrato sólido para se associar.

Nossos mesocosmos tiveram uma densidade de 26 indivíduos por amostra, em regiões temperadas esse resultado é bastante contrastante, porque nessas regiões a densidade de indivíduos é aproximadamente cinco vezes maior (HEINO *et al.*, 2018). Em ambientes tropicais existe uma menor densidade natural, decorrente do metabolismo mais acelerado que encurta os ciclos de vida e inibe o acúmulo de biomassa (a troca de biomassa é constante) (BROWN *et al.*, 2004, SAITO, PERKINS & KRATINA 2021). Isso acaba por interferir nas respostas a nível de comunidade com mesocosmos de pequenas dimensões, o que afeta a comparação entre os nossos resultados e os resultados com sistemas de outras regiões. Por mais que os experimentos sejam padronizados, é possível que as dimensões dos mesocosmos sejam suficientes para caracterizar as comunidades mais adensadas dos climas temperados, mas sejam menos precisas em regiões naturalmente menos adensadas.

4.2 Nutrientes

Nossa segunda hipótese previu que o aumento dos nutrientes iria acelerar a produção secundária dos macroinvertebrados, uma vez que a maior quantidade de nutrientes promoveria a produção primária. A maior produção secundária dos organismos de menor tamanho iria resultar em interceptos maiores no espectro de tamanho. Nossos resultados corroboraram parcialmente esta hipótese, dado que entre todos os três estressores testados, este foi o de influência menos sistemática, com suave indicação de aumento na densidade de algumas espécies grandes, como Ostracoda. Esses resultados estão de acordo com os obtidos pelo enriquecimento de nutrientes em experimentos relacionados a múltiplos estressores na Nova Zelândia (TOWNSEND *et al.*, 2008; MATTHAEI *et al.*, 2010; WAGENHOFF *et al.*, 2012), onde foram observados efeitos positivos do enriquecimento sob o tamanho dos macroinvertebrados.

Pode-se concluir que apesar de certas limitações, este estudo forneceu novos *insights* sobre as maneiras pelas quais as comunidades de macroinvertebrados

podem responder a múltiplos estressores. O aumento de sedimento fino e a diminuição do fluxo de água alteraram a abundância e riqueza total das comunidades de macroinvertebrados de forma interativa, independentemente do tamanho dos indivíduos. Nos mesocosmos do sistema ExStream mesmo as comunidades do tratamento controle foram dominadas por táxons relativamente resistentes e isso pode ter influenciado na ausência de respostas ao espectro de tamanho, por conta da simplificação generalizada da rede trófica. Ademais, sistemas tropicais possuem abundâncias menores de macroinvertebrados em comparação à sistemas temperados, trazendo complexidades adicionais em experimentos de mesocosmos com dimensões pequenas e que visem analisar padrões em redes tróficas, como espectros de tamanho e fluxos de energia.

5- Referências

- ALLAN, J. D. Landscapes and riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems. *Annual Review Ecology Evolution. System*, n. 35, p. 257-284, 2004.
- ANDERSEN, T.; PINHO, L. C.; MENDES, H. F. *Titimbera*, a new genus of Orthoclaadiinae from South and Central America (Diptera: Chironomidae). *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, v. 50, n. 2, p. 96-106, 2015.
- BARR, N.; ZELDIS, J.; SCHEUER, K.; SCHIEL, D. Macroalgal bioindicators of recovery from eutrophication in a tidal lagoon following wastewater diversion and earthquake disturbance. *Estuaries and Coasts*, v. 43, n. 2, p. 240-255, 2020.
- BARROS, F.; CARVALHO, G. C.; COSTA, Y.; HATJE, V. Subtidal benthic macroinfaunal assemblages in tropical estuaries: generality amongst highly variable gradients. *Marine environmental research*, v. 81, p. 43-52, 2012.
- BEERMANN, A.J.; ELBRECHT, V.; KARNATZ, S.; MA, L.; MATTHAEI, C. D.; PIGGOTT, J. J., & LEESE, F. Multiple-stressor effects on stream macroinvertebrate communities: A mesocosm experiment manipulating salinity, fine sediment and flow velocity. *Science of the Total Environment*, v. 610, p. 961-971, 2018.
- BESSA, F.; GONÇALVES, S. C.; FRANCO, J. N.; ANDRÉ, J. N.; CUNHA, P. P.; Marques, J. C. Temporal changes in macrofauna as response indicator to potential human pressures on sandy beaches. *Ecological Indicators*, v. 41, p. 49-57, 2014.

BEZZERIL Jr. Recursos Hídricos no Estado de São Paulo. Engenharia, São Paulo, 478:14-29, 1990.

BLANCHET, H.; LAVESQUE, N.; RUELLET, T.; DAUVIN, J. C.; SAURIAU, P. G.; DESROY, N.; DE MONTAUDOUIN, X. Use of biotic indices in semi-enclosed coastal ecosystems and transitional waters habitats—implications for the implementation of the European Water Framework Directive. *Ecological indicators*, v. 8, n. 4, p. 360-372, 2008.

BROWN, C.; BRAITHWAITE, V. A. Size matters: a test of boldness in eight populations of the poeciliid *Brachyrhaphis episcopi*. *Animal Behaviour*, v. 68, n. 6, p. 1325-1329, 2004.

COLLINS, A. L.; NEWELL, J. P.; ZHANG Y. R.; GOODAY, P. S.; NADEN, D. Skirvin Assessing the potential impacts of a revised set of on-farm nutrient and sediment 'basic' control measures for reducing agricultural diffuse pollution across England *Scienc. Total Environ*, n. 621, p. 1499-1511, 2018.

COLLYER, G.; PERKINS, D. M.; PETSCH, D. K.; SIQUEIRA, T.; & SAITO, V. . Land-use intensification systematically alters the size structure of aquatic communities in the Neotropics. *Global Change Biology*, 2023.

CORTES, R. M. V.; FERREIRA, M. T.; OLIVEIRA, S. V.; OLIVEIRA, D. Macroinvertebrate community structure in a regulated river segment with different flow conditions. *River Research and Applications*, v. 18, n. 4, p. 367-382, 2002.

DAUVIN, J. C. Le benthos: témoin des variations de l'environnement. *Océanis* v.19, p.25-53, 1993.

DAVIS, ST. J.; MELLANDER, P. E.; KELLY, A. M.; MATTHAEI, C. D.; PIGGOTT, J. J., & KELLY-QUINN, M. Multiple-stressor effects of sediment, phosphorus and nitrogen on stream macroinvertebrate communities. *Science of the Total Environment*, v. 637, p. 577-587, 2018.

DE CARVALHO, W. S.; DA SILVA SANTOS, L. R.; DE OLIVEIRA, S. F.; DE OLIVEIRA, F. M. P.; ARNAN, X.; LEAL, I. R. Formigas como provedoras de serviços ecossistêmicos na Caatinga: Como informar a sociedade sobre pesquisas

ecológicas. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 5, n. 3, p. 281-287, 2020.

DE OLIVEIRA GOMES, L. E.; CORREA, L. B.; SÁ, F.; NETO, R. R.; BERNARDINO, A. F. The impacts of the Samarco mine tailing spill on the Rio Doce estuary, Eastern Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, v. 120, n. 1-2, p. 28-36, 2017.

DONADI, S.; ERIKSSON, B. K.; LETTMANN, K. A.; HODAPP, D.; WOLFF, J. O.; HILLEBRAND, H. The body-size structure of macrobenthos changes predictably along gradients of hydrodynamic stress and organic enrichment. *Marine Biology*, v. 162, n. 3, p. 675-685, 2015.

DUARTE, G. T.; SANTOS, P. M.; CORNELISSEN, T. G.; RIBEIRO, M. C.; PAGLIA, A. P.; The effects of landscape patterns on ecosystem services: meta-analyses of landscape services. *Landscape Ecology*, v. 33, n. 8, p. 1247-1257, 2018.

EDWARDS, A. M.; ROBINSON, J. P.; PLANK, M. J., BAUM, J. K.; & BLANCHARD, J. L. Testing and recommending methods for fitting size spectra to data. *Methods in Ecology and Evolution*, v. 8, n. 1, p. 57-67, 2017.

ELBRECHT, V.; BEERMANN, A. J.; GOESSLER, G.; NEUMANN, J.; TOLLRIAN, R.; WAGNER, R., ... & LEESE, F. Multiple-stressor effects on stream invertebrates: a mesocosm experiment manipulating nutrients, fine sediment and flow velocity. *Freshwater Biology*, v. 61, n. 4, p. 362-375, 2016.

FOX, J.; FRIENDLY, G. G.; GRAVES, S.; HEIBERGER, R.; MONETTE, G., NILSSON, H., ... & SUGGESTS, M. A. S. S. The car package. *R Foundation for Statistical Computing*, 1109, 2007.

GONÇALVES, T. D. Mapeamento de solos e de produtividade em plantações de *Eucalyptus grandis* na Estação Experimental de Itatinga, ESALQ, com uso de geoprocessamento. 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

GONZALES-INCA, P.; VALKAMA, J. O.; LILL, J.; SLOTTE, E.; HIETAHARJU, R. Uusitalo Spatial modeling of sediment transfer and identification of sediment sources during snowmelt in an agricultural watershed in boreal climate *Science Total Environ*, n. 612, p.303-312, 2018.

GRAEBER, D.; PUSCH, M. T.; LORENZ, S.; BRAUNS, M. Cascading effects of flow reduction on the benthic invertebrate community in a lowland river. *Hydrobiologia*, v. 717, n. 1, p. 147-159, 2013.

GESUALDO, G. C.; OLIVEIRA, P. T.; RODRIGUES, D. B. B., & GUPTA, H. V. Assessing water security in the São Paulo metropolitan region under projected climate change. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 23, n. 12, p. 4955-4968, 2019.

HEINO, J.; MELO, A. S.; JYRKÄNKALLIO-MIKKOLA, J.; PETSCH, D. K.; SAITO, V. S.; TOLONEN, K. T., ... & SIQUEIRA, T. Subtropical streams harbour higher genus richness and lower abundance of insects compared to boreal streams, but scale matters. *Journal of Biogeography*, 2018.

JARVIE, P.J.A.; WITHERS, M.J.; BOWES, E.J.; PALMERFELGATE, D.M.; HARPER, K.W.; ASIAK, P.; WASIAK, R.A.; HODGKINSON, A.; BATES, C.; STOATE, M.; NEAL, H.D.; WICKHAM, S.A.; HARMAN, L.K. Armstrong Streamwater phosphorus and nitrogen across a gradient in rural–agricultural land use intensity. *Agricultural Ecosystem Environment*, n. 135, p. 238-252, 2010.

JENNINGS, S.; BLANCHARD, J. L. Fish abundance with no fishing: predictions based on macroecological theory. *Journal of Animal Ecology*, p. 632-642, 2004.

JONES, J. I.; MURPHY, J. F.; COLLINS, A. L.; SEAR, D. A.; NADEN, P. S.; ARMITAGE, P. D. The impact of fine sediment on macro-invertebrates. *River research and applications*, v. 28, n. 8, p. 1055-1071, 2012.

JORDAN, A.; ARNSCHEIDT, H.; MCGROGAN, S.; MCCORMICK. Characterising phosphorus transfers in rural catchments using a continuous bank-side analyser *Hydrology. Earth System Science*, n. 11, ed. 1, p. 372-381, 2007.

JUVIGNY-KHENAFU, N. D.; PIGGOTT, J. J.; ATKINSON, D.; ZHANG, Y.; MACAULAY, S. J.; WU, N., & MATTHAEI, C. D. IMPACTS of multiple anthropogenic stressors on stream macroinvertebrate community composition and functional diversity. *Ecology and evolution*, v. 11, n. 1, p. 133-152, 2021.

KNOX, J. C. Agricultural influence on landscape sensitivity in the Upper Mississippi River Valley. *Catena*, v. 42, n. 2-4, p. 193-224, 2001.

LANA, P. C.; CAMARGO, M. G.; BROGIM, R. A.; ISAAC, V. Os bentos da costa brasileira. Avaliação crítica e levantamento bibliográfico (1858-1996). Rio de Janeiro, FREMAR, p.432, 1996.

LENTH R, LENTH MR. Package 'lsmeans'. *The American Statistician*, 2018.

MARTÍNEZ, A.; LARRAÑAGA, A.; MIGUÉLEZ, A.; YVON-DUROCHER, G.; POZO, J. Land use change affects macroinvertebrate community size spectrum in streams: the case of *Pinus radiata* plantations. *Freshwater Biology*, v. 61, n. 1, p. 69-79, 2016.

MATTHAEI, C. D.; PIGGOTT, J. J.; TOWNSEND, C. R. Multiple stressors in agricultural streams: interactions among sediment addition, nutrient enrichment and water abstraction. *Journal of Applied Ecology*, v. 47, n. 3, p. 639-649, 2010.

MATTHAEI, C.D.; PIGGOTT, J. J.; TOWNSEND, C. R. Multiple stressors in agricultural streams: interactions among sediment addition, nutrient enrichment and water abstraction. *Journal of Applied Ecology*, v. 47, n. 3, p. 639-649, 2010.

MEA, Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: wetlands and water synthesis*, 2005.

MOLINA, M. C. O tamanho de faixa ripária florestada influencia os padrões funcionais de peixes de riachos. 2017.

NHIWATIWA, T.; DALU, L.; BRENDONCK, I. Impact of irrigation based sugarcane cultivation on the Chiredzi and Runde rivers quality, Zimbabwe Science. *Total environment*, p. 587-588, 2017.

NIYOGI, D. K.; KOREN, M.; ARBUCKLE, C. J.; TOWNSEND, C. R. Stream communities along a catchment land-use gradient: subsidy-stress responses to pastoral development. *Environmental management*, v. 39, n. 2, p. 213-225, 2007.

NORRKO, A.; VILLNÄS, J.; NORRKO, S.; VALANKO, C. P. Size matters: implications of the loss of large individuals for ecosystem function *Science*, p. 2646, 2013.

NYBAKKEN, S.; BERG, R.-A. The Nordkapp basin, Barents Sea-Basin development and halokinesis. In: 55th EAEG Meeting. European Association of Geoscientists & Engineers, p.46 -48, 1993.

ORMEROD, S. J.; DOBSON, M.; HILDREW, A. G.; TOWNSEND, C. Multiple stressors in freshwater ecosystems, 2010.

OKSANEN, J.; BLANCHET, F.G.; KINDT, R.; LEGENDRE, P.; O'HARA, R. G.; SIMPSON, G. L.; SOLYMOS, P.; STEVENS, M.H.H.; WAGNER, H. Vegan: Community Ecology Package. R package version 1.17-1. <http://CRAN.R-project.org/package=vegan>, 2010.

PERALTA-MARAVER, I.; STUBBINGTON, R.; ARNON, S.; KRATINA, P.; KRAUSE, S.; DE MELLO CIONEK, V.; LEITE, N. K.; LEMES DA SILVA, A. L.; THOMAS, S. M.; POSSELT, M.; MILNER, V. S.; MOMBLANCH, A.; MORETTI, M. S.; NÓBREGA, R. L. B.; PERKINS, A. M.; RECHE, I.; SAITO, V. ; ROBERTSON, A. L; The riverine bioreactor: an integrative perspective on biological decomposition of organic matter across riverine habitats. *Science of the Total Environment*, p. 145494, 2021.

PERKINS, D. M.; DURANCE, I.; EDWARDS, F. K.; GREY, J.; HILDREW, A. G.; JACKSON, M.; WOODWARD, G. Bending the rules: exploitation of allochthonous resources by a top-predator modifies size-abundance scaling in stream food webs. *Ecology letters*, v. 21, n. 12, p. 1771-1780, 2018.

PETSCH, D. K.; PINHA, G. D.; TAKEDA, A. M. Dispersal mode and flooding regime as drivers of benthic metacommunity structure in a Neotropical floodplain. *Hydrobiologia*, v. 788, p. 131-141, 2017.

PIGGOTT, J. NIYOGI, D. K.; TOWNSEND, C. R.; & MATTHAEI, C. D. Multiple stressors and stream ecosystem functioning: climate warming and agricultural stressors interact to affect processing of organic matter. *Journal of Applied Ecology*, v. 52, n. 5, p. 1126-1134, 2015.

POMERANZ, J.; WESNER, J. Spatiotemporal variability of abundance size-spectra in streams across North America. *Authorea Preprints*, 2020.

RODRIGUES, C. B.; TANIWAKI, R. H.; LANE, P.; LIMA, W. D. P.; & FERRAZ, S. F. D. B. Eucalyptus short-rotation management effects on nutrient and sediments in subtropical streams. *Forests*, v. 10, n. 6, p. 519, 2019.

SAITO, V. S.; PERKINS, D. M.; KRATINA, P. A Metabolic Perspective of Stochastic Community Assembly. *Trends in Ecology & Evolution*, 2021.

SAITO, V. S.; SIQUEIRA, T.; FONSECA-GESSNER, A. A. Should phylogenetic and functional diversity metrics compose macroinvertebrate multimetric indices for stream biomonitoring?. *Hydrobiologia*, ed. 745, n.1, p. 167-179, 2015.

SAVAGE, C.; ELMGREN, R.; LARSSON, U. Effects of sewage-derived nutrients on an estuarine macrobenthic community. *Marine Ecology Progress Series*, v. 243, p. 67-82, 2002.

SCHIESARI, L.; SAITO, V.; FERREIRA, J.; FREITAS, L. S.; GOEBBELS, A. J.; EITE, J. P. C. B., ... & MARTINELLI, L. A. Community reorganization stabilizes freshwater ecosystems in intensively managed agricultural fields. *Journal of Applied Ecology*, 2023.

STRAHLER, A. N. Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks. *Handbook of applied hydrology*, 1964.

SCOTT, F.; BLANCHARD, J. L.; ANDERSEN, K. H. mizer: an R package for multispecies, trait-based and community size spectrum ecological modelling. *Methods in Ecology and Evolution*, v. 5, n. 10, p. 1121-1125, 2014.

TOWNSEND, C. R.; UHLMANN, S. S.; MATTHAEI, C. D. Individual and combined responses of stream ecosystems to multiple stressors. *Journal of Applied Ecology*, v. 45, n. 6, p. 1810-1819, 2008.

TOWNSEND, C. R.; UHLMANN, S.S.; MATTHAEI, C. D. Individual and combined responses of stream ecosystems to multiple stressors. *Journal of Applied Ecology*, v. 45, n. 6, p. 1810-1819, 2008.

TRIVINHO-STRIXINO, S. Larvas de Chironomidae: guia de identificação. São Carlos: UFSCar, v. 1, n. 2, 2011.

WADDLE, T. J.; HOLMQUIST, J. G. Macroinvertebrate response to flow changes in a subalpine stream: Predictions from two-dimensional hydrodynamic models. *River Research and Applications*, v. 29, n. 3, p. 366-379, 2013.

WAGENHOFF, A.; TOWNSEND, C. R.; MATTHAEI, C. D. Macroinvertebrate responses along broad stressor gradients of deposited fine sediment and dissolved nutrients: a stream mesocosm experiment. *Journal of Applied Ecology*, v. 49, n. 4, p. 892-902, 2012.

WAGENHOFF, A.; TOWNSEND, C. R.; PHILLIPS, N.; MATTHAEI, C. D. Subsidy-stress and multiple-stressor effects along gradients of deposited fine sediment and dissolved nutrients in a regional set of streams and rivers. *Freshwater Biology*, v. 56, n. 9, p. 1916-1936, 2011.

WARWICK, R. M.; COLLINS, N. R.; GEE, J. M.; GEORGE, C. L. Species size distributions of benthic and pelagic Metazoa: evidence for interaction?. *Marine Ecology Progress Series*, v. 34, p. 63-68, 1986.

WHITE, E. P.; ERNEST, S. M.; KERKHOFF, A. J.; ENQUIST, B. J. Relationships between body size and abundance in ecology. *Trends in ecology & evolution*, v. 22, n. 6, p. 323-330, 2007.

WOOD, P. J.; ARMITAGE, P. D. Biological effects of fine sediment in the lotic environment. *Environmental management*, v. 21, n. 2, p. 203-217, 1997.

WOODWARD, G.; SPEIRS, D. C.; HILDREW, A. G.; HAL, C. Quantification and resolution of a complex, size-structured food web. *Advances in ecological research*, v. 36, p. 85-135, 2005.

ZHANG, Y.; CHENG, L.; TOLONEN, K. E.; YIN, H.; GAO, J.; ZHANG, Z.; CAI, Y. Substrate degradation and nutrient enrichment structuring macroinvertebrate assemblages in agriculturally dominated Lake Chaohu Basins, China Science. *Total environment*, n. 627, p. 57-66, 2018.

Material suplementar

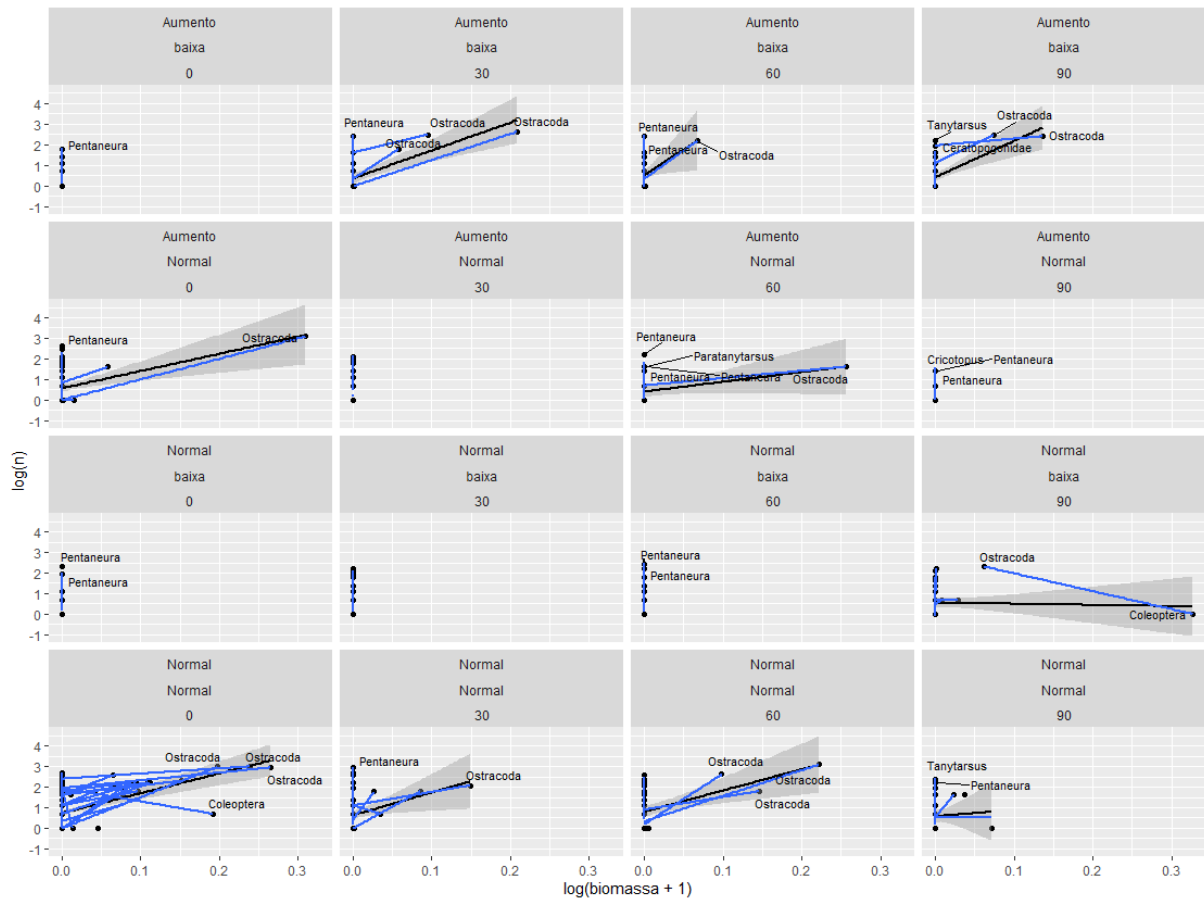


Figura S1. Local size density para cada mesocosmo em relação aos tratamentos do experimento. Os modelos em azul indicam os espectros locais e os modelos em preto com sombras em cinza indicam os modelos para cada combinação de tratamento com seu erro padrão.