

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

HETEROGENEIDADE AMBIENTAL E BIODIVERSIDADE: ESTADO DA ARTE DE CONHECIMENTOS COMO SUBSÍDIO À GESTÃO E MANEJO DE RECURSOS HÍDRICOS

Janaina Agra¹; Tatiana Cornelissen² & Marcos Callisto³

Palavras-Chave – Complexidade ambiental, revisão sistemática, bacias hidrográficas.

RESUMO

Os efeitos da heterogeneidade ambiental (EH) sobre a biodiversidade têm sido estudados desde a década de 60 e há um padrão geral que prevê que quanto maior a EH em um local, maior a riqueza de espécies. Por esse motivo, vem crescendo o uso de técnicas de manejo de recursos hídricos que têm por objetivo incrementar a EH para recuperar a biodiversidade aquática. No entanto, não se sabe quais fatores ambientais atuam significativamente no aumento da EH e, por consequência, na efetiva recuperação da biodiversidade. O objetivo desse estudo foi sintetizar o conhecimento existente sobre o efeito da EH sobre a biodiversidade em ecossistemas de água doce. Realizamos uma revisão sistemática da literatura internacional e analisamos como diferentes estudos conceituam a EH, quais fatores ambientais são avaliados, quais grupos biológicos são mais estudados e como a EH é mensurada. Observamos que há ausência de padronização de conceitos e terminologias empregadas, devido à alta variedade de critérios utilizados para quantificar a EH nesses ecossistemas. Destacamos o menor número de evidências que testaram o efeito da EH sobre organismos planctônicos, o que pode dificultar ações de restauração desse grupo de organismos. Como perspectivas futuras, sugerimos a ampliação de estudos em mesocosmos para testar os diferentes fatores ambientais com potencial efeito positivo sobre a biodiversidade. Além disso, ressaltamos que as políticas de recuperação e manejo dos recursos hídricos devam ocorrer em múltiplas escalas espaciais para garantir sucesso e efetividade.

INTRODUÇÃO

Heterogeneidade ambiental refere-se a toda e qualquer medida que evidencie variações de condições ambientais e recursos entre locais em uma mesma região (Anderson *et al.*, 2006). Espera-se que em ambientes mais heterogêneos seja observado maior número de espécies, pois há maior diversidade de recursos alimentares, locais para refúgio e maior variedade de condições ambientais para espécies com requerimentos distintos (Hutchinson, 1959; Macarthur e Macarthur, 1961). Em ecossistemas de água doce (p.ex., riachos, rios, lagos e reservatórios hidrelétricos), a heterogeneidade ambiental pode ser avaliada por diversos fatores ambientais, incluindo a velocidade de fluxo de água, a morfologia do canal e a composição sedimentológica do leito fluvial.

Um recente estudo global de meta-análise confirmou a relação positiva entre heterogeneidade ambiental e riqueza de espécies em experimentos controlados (Ortega *et al.*, 2018). No entanto, não se sabe como diferentes níveis de distúrbios antrópicos afetam essa relação e quais fatores ambientais determinam o aumento significativo na heterogeneidade ambiental de um ecossistema de água doce,

¹) Universidade Federal de Minas Gerais, janaina.agra88@gmail.com

²) Universidade Federal de Minas Gerais, callistom@ufmg.br

³) Universidade Federal de Minas Gerais, taticornelissen@gmail.com

e por consequência, a biodiversidade aquática (Agra *et al.*, 2020). Apesar das lacunas de conhecimentos existentes, a aplicação de técnicas de incremento de heterogeneidade ambiental tem sido utilizada como medida de restauração de condições adequadas à biodiversidade aquática por gestores ambientais (p.ex. adição de troncos e seixos no canal fluvial, recomposição de meandros e habitats) (Bernhardt *et al.*, 2005; Feio *et al.*, 2021). Uma das razões para isso é o fato de que a homogeneização ambiental causada por atividades humanas (p.ex. barramentos de grandes rios, canalizações de córregos e assoreamento de cursos d'água) ser considerada uma das principais causas de perda da biodiversidade em ecossistemas de água doce, em todo o mundo (Reid *et al.*, 2019).

Projetos de restauração de ecossistemas de água doce têm cada vez mais incluído medidas de incremento de heterogeneidade ambiental (Bernhardt *et al.*, 2005). Porém, muitos dos projetos têm falhado em obter resultados positivos, levantando dúvidas sobre os reais efeitos da heterogeneidade ambiental sobre a biodiversidade aquática (Palmer *et al.*, 2005). Como possíveis explicações para as dificuldades há questionamentos sobre quais fatores ambientais devam ser manipulados (p.ex. substrato, fluxo de água, morfologia do canal), e se os fatores ambientais manipulados devam variar a depender do grupo biológico (p.ex. peixes, insetos aquáticos, anfíbios) (Palmer *et al.*, 2010).

O objetivo desse estudo foi sintetizar o conhecimento existente na literatura internacional sobre a relação entre heterogeneidade ambiental e biodiversidade em ecossistemas de água doce, incluindo fatores ambientais avaliados como *proxy* de heterogeneidade ambiental. Elencamos as abordagens de cálculo mais frequentemente utilizadas para mensurar a heterogeneidade ambiental e discutimos como essas informações podem ser úteis à gestão e manejo de recursos hídricos.

METODOLOGIA

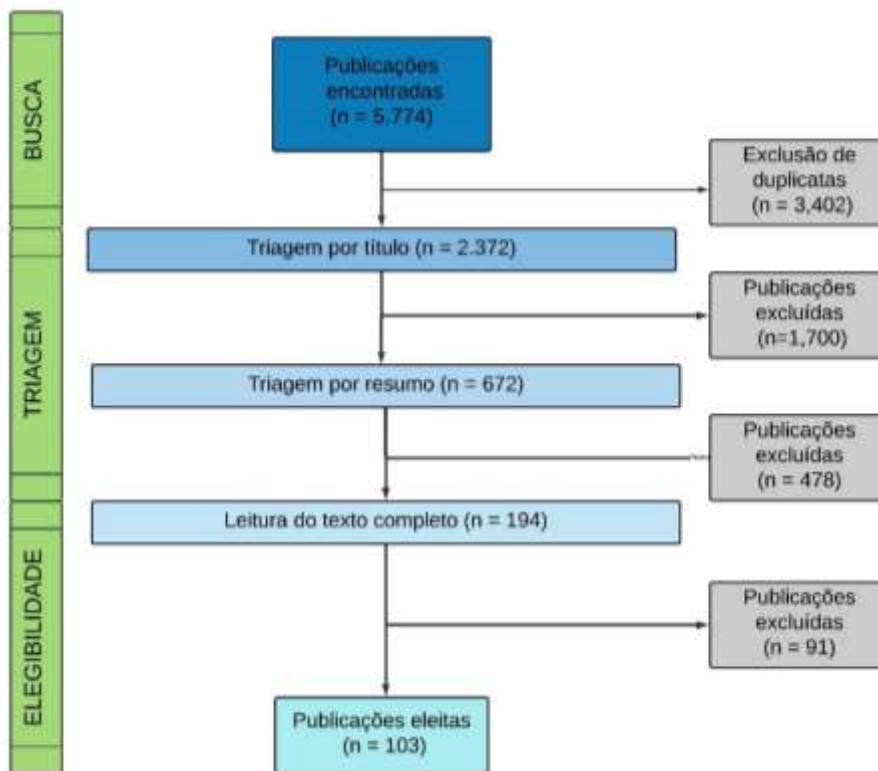
Nós realizamos uma busca sistematizada na literatura internacional de artigos que investigaram o efeito da heterogeneidade ambiental sobre medidas de diversidade biológica em ecossistemas de água doce. Aplicamos três abordagens de busca, objetivando detectar o máximo de estudos possíveis e, por consequência, evitando o enviesamento dos dados (Koricheva *et al.*, 2013).

A primeira abordagem consistiu na busca por termos nas principais bases de publicações científicas (ISI Web of Science, Scopus e Scielo) entre os anos de 1945 até 2020. Utilizamos 36 combinações de termos que são frequentes em estudos sobre heterogeneidade ambiental (p.ex. "habitat* heterogen*" OR "habitat* diversity" OR "habitat* complexity" OR "structural complexity" OR "fractal heterogen*" OR "biotop* heterogen*" OR "environment* complexity"). A segunda abordagem consistiu na busca geral de artigos na plataforma do Google Scholar, utilizando os quatro termos mais comuns em estudos sobre heterogeneidade ambiental (Stein *et al.*, 2015). Por último, foi incluída uma busca direcionada às referências bibliográficas de artigos recentes de revisão sistemática sobre o assunto (Ortega *et al.*, 2018; Palmer *et al.*, 2010).

Após excluir os artigos duplicados nos resultados de busca nas bases de publicações científicas, foram obtidos 2.372 artigos (Figura 1). Na etapa de triagem foi realizada a leitura de títulos e resumos. Os artigos foram selecionados se: (i) testassem explicitamente o efeito da heterogeneidade ambiental sobre alguma medida de diversidade biológica, (ii) observacionais ou experimentais, (iii) em ecossistemas de água doce e com assembleias de organismos aquáticos, e (iv) considerassem apenas a heterogeneidade espacial. Após excluir 2.178 artigos, os 194 estudos restantes foram lidos na íntegra para confirmação de sua elegibilidade.

Ao final da etapa de elegibilidade, restaram 103 artigos que foram utilizados para a extração dos dados de: a) terminologia utilizada para "heterogeneidade ambiental", b) variáveis ambientais mensuradas como *proxy* de heterogeneidade ambiental, c) abordagem utilizada para calcular os *proxies*, d) tipo de ecossistema avaliado (p.ex. lótico, lêntico e mesocosmos), e) o compartimento limnológico de ocorrência dos organismos (p.ex. nécton, plâncton e bentos).

Figura 1: Etapas de identificação, triagem e elegibilidade dos artigos para obtenção de dados.

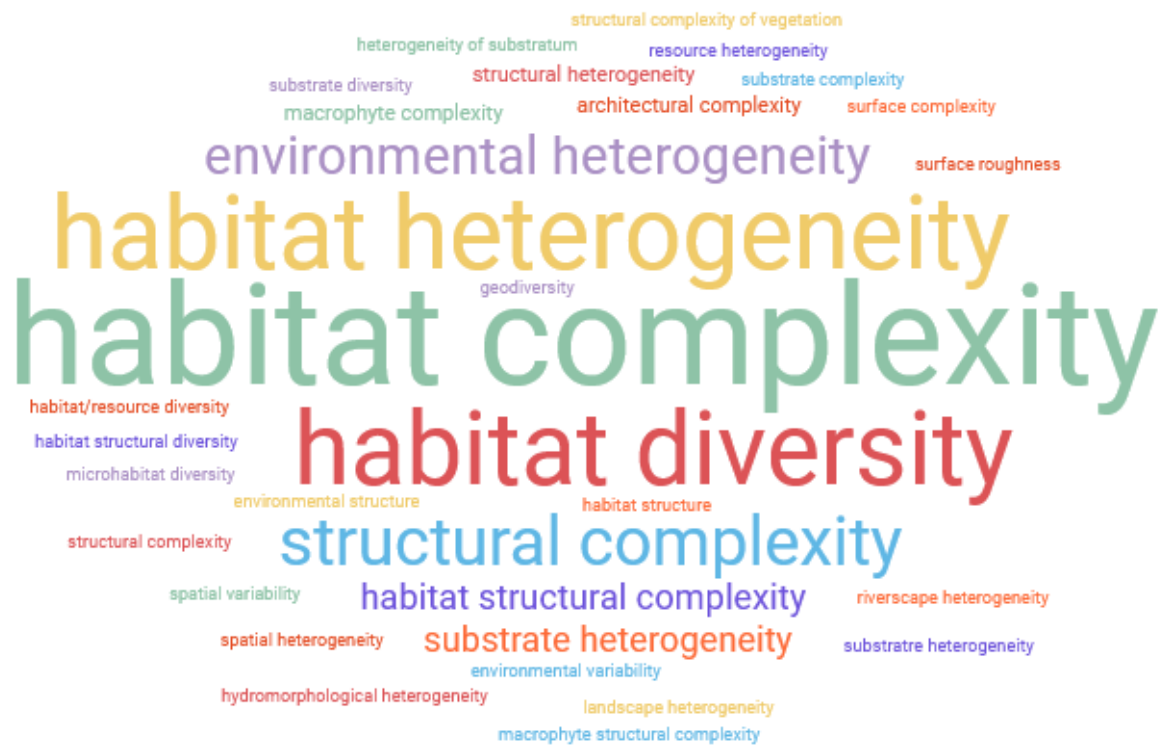


RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os 103 artigos selecionados abrangem todos os continentes, exceto a Antártida, somando 32 países. A região Neotropical foi a mais estudada, correspondendo a 30,10 % de todos os estudos, com destaque para o Brasil (N = 24). A região Paleártica englobou 29,13 % de todas as publicações, seguida das regiões Neártica (21,36 %), Australásia (10,68 %), Indomalásia (4,85 %) e Afrotropical (2,91 %). Apesar do maior número de estudos publicados em região Neotropical, essa região ainda apresenta alta defasagem na implementação de projetos de restauração com foco no incremento de heterogeneidade ambiental (Feio *et al.*, 2021). As possíveis causas dessa disjunção entre produção científica e a implementação de projetos de restauração devem-se a: (i) escassez de investimentos públicos na área de meio ambiente; (ii) inexistência de um plano federativo de monitoramento contínuo de recursos hídricos nos países dessas regiões; (iii) consciência limitada dos tomadores de decisão (p.ex. México, América do Sul e África) (Feio *et al.*, 2021; Wantzen *et al.*, 2019).

Além disso, observamos inconsistência de terminologias utilizadas em artigos sobre “heterogeneidade ambiental”, tendo sido identificados 33 termos diferentes (Figura 2). Dentre os 103 artigos, os termos mais frequentemente utilizados foram “habitat complexity”, “habitat heterogeneity”, “habitat diversity”, “structural complexity” e “environmental heterogeneity”. Os três primeiros termos previamente citados em estudos de ecossistemas aquáticos também são os mesmos que são mais frequentemente utilizados em estudos realizados em ecossistemas terrestres (Stein e Kreft, 2015). O elevado número de terminologias evidencia uma debilidade no estabelecimento de conceitos e classificações de avaliação de heterogeneidade ambiental, o que pode dificultar a implementação desses estudos ecológicos na gestão de recursos hídricos. Apesar da inconsistência de terminologias observada nos artigos em ecossistemas de água doce, essa é bem menor quando comparada aos ecossistemas terrestres, onde foram catalogados 130 termos (Stein e Kreft, 2015).

Figura 2: Nuvem de palavras com a frequência de termos utilizados em 103 artigos que testaram o efeito da heterogeneidade ambiental sobre métricas de diversidade biológica em ecossistemas de água doce.



Os 103 artigos publicados geraram 385 testes independentes, visto que um mesmo artigo pode ter realizado mais de um teste estatístico para avaliar o efeito da heterogeneidade ambiental sobre métricas de diversidade biológica.

Podemos afirmar que um maior entendimento do efeito da heterogeneidade ambiental sobre as assembléias aquáticas está concentrado sobre os organismos que habitam rios e riachos (69 %). Em ecossistemas lênticos, como lagos e reservatórios, foram realizados 29 % dos testes, enquanto que apenas 3 % foram realizados em mesocosmos (Figura 3). Visando aprimoramento de técnicas de restauração fluvial, sugerimos o maior investimento em estudos em mesocosmos considerando as vantagens metodológicas de controle restritivo de fatores ambientais que influenciam os experimentos, para posterior aplicação das técnicas *in situ*. Além disso, o uso de mesocosmos tem-se mostrado fundamental no entendimento de mecanismos que governam a relação entre heterogeneidade ambiental e diversidade biológica (Ortega *et al.*, 2018).

Os organismos que habitam o fundo de ecossistemas aquáticos, a exemplo dos macroinvertebrados, e aqueles que vivem na zona nectônica (p.ex. peixes) foram os mais utilizados para avaliar o efeito de heterogeneidade sobre biodiversidade, representando 67 % e 24 % dos testes, respectivamente. Em menor número as zonas planctônicas (2 %) e a biota associada às macrófitas aquáticas (2 %) foram também avaliadas. Além disso, 5 % dos testes avaliaram organismos terrestres diretamente associados aos ecossistemas de água doce (p.ex. aves aquáticas e anfíbios adultos) (Figura 3). Provavelmente, isso deve-se à dificuldade de estabelecer os fatores ambientais que determinam a heterogeneidade ambiental para organismos que habitam a coluna d'água e que vivem de modo errante (Kovalenko *et al.*, 2012). Portanto, entendemos que projetos que objetivem a recuperação da biodiversidade de organismos planctônicos ou organismos terrestres associados aos ecossistemas aquáticos de água doce terão alto risco de insucesso na aplicação de técnicas efetivas de incremento de heterogeneidade ambiental, devido ao baixo número de evidências publicadas e valores de referência referendados pela literatura internacional existente.

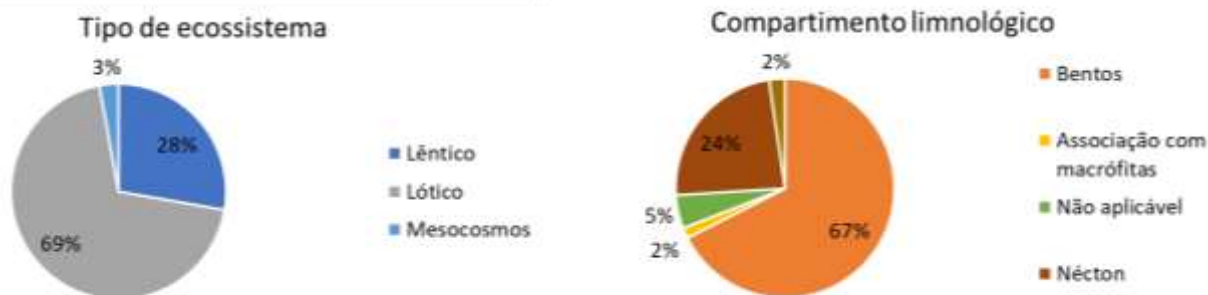


















Figura 3: Percentual de testes realizados de acordo com o tipo de ecossistema avaliado e o compartimento limnológico avaliado. Número total de testes independentes: 385.

A maior parte dos testes realizados foi observacional ($N = 228$), seguida por 157 experimentais. Sintetizando a variedade de métodos utilizados para mensurar a heterogeneidade ambiental, foram criados agrupamentos de fatores ambientais em cada estudo como *proxy* de heterogeneidade ambiental: i) altitude; ii) vegetação aquática; iii) substratos artificiais; iv) morfologia de canal fluvial; v) recursos alimentares; vi) uso e ocupação do solo; vii) vegetação ripária; viii) substrato; ix) físico-química da água; x) velocidade de fluxo; e xi) detritos de madeira. Além disso, testes que incluíam variáveis de mais de uma dessas categorias de elementos foram incluídos em um agrupamento chamado de “múltiplos fatores” (xii). Para testar o efeito da heterogeneidade ambiental sobre métricas de diversidade, a maior parte dos artigos selecionou um único fator ambiental como *proxy* de heterogeneidade ambiental (82,86 %) (p.ex. substrato, fluxo de água), enquanto que 17,14 % dos testes consideraram mais de duas categorias de fatores ambientais para calcular medidas de heterogeneidade ambiental (p.ex. detritos de madeira e físico-química da água).

Foram utilizadas oito diferentes abordagens para calcular a heterogeneidade ambiental: 1) estrutura; 2) densidade; 3) presença *vs* ausência; 4) variação qualitativa; 5) variação quantitativa; 6) rugosidade; 7) variação de tamanho; e, naqueles em que foram considerados mais de um tipo de fator ambiental na mensuração da heterogeneidade ambiental, 8) múltipla (Tabela 1).

Tabela 1: Categorias de abordagens de cálculo de *proxies* de heterogeneidade ambiental, com respectivos conceitos, sinônimos observados em diferentes artigos, exemplos de métodos de cálculo matemático e um resumo gráfico. No resumo gráfico, cada forma representa um tipo de fator ambiental e as cores representam variantes de um mesmo fator.

Abordagem de Cálculo	Conceito	Sinônimo	Exemplo de cálculo matemático	Resumo gráfico	
				Homogêneo	Heterogêneo
ESTRUTURA	Quanto mais complexa for a estrutura de um fator ambiental, maior será a heterogeneidade ambiental neste local	Forma, fractais, arquitetura	Canais com meandros vs canais retificados; Macrófitas com formato complex vs macrófitas com formato simples		
DENSIDADE	Quanto maior for a densidade de um único fator ambiental em um local, maior será a heterogeneidade neste local	Abundância	Densidade de plantas aquáticas; abundância de troncos de madeira		
PRESEÇA vs AUSÊNCIA	A adição de um fator ambiental representará o aumento da heterogeneidade ambiental no local	-	Presença de mata ripária vs Ausência de mata ripária		
VARIAÇÃO QUALITATIVA	Quanto maior for a variedade de características de um fator ambiental em um local, maior será a heterogeneidade neste local	Riqueza; variação composicional	Índice de diversidade de Shannon-Wiener para tipos de cobertura vegetal; riqueza de tipos de substrato		
VARIAÇÃO QUANTITATIVA	Quanto maior for a variação de um único fator ambiental em um local, maior será a heterogeneidade neste local	-	Coefficiente de variação do tamanho das partículas de substrato; Desvio padrão da velocidade de fluxo da água		
RUGOSIDADE	Quanto maior for a rugosidade de um fator ambiental, maior será a heterogeneidade ambiental neste local	Topografia; textura	Substrato rugoso vs substrato liso		
VARIAÇÃO DE TAMANHO	Quanto maior for a variação de tamanho de um fator ambiental, maior será a heterogeneidade ambiental neste local	Composição de tamanho	Substrato com diferentes tamanhos de partícula vs substrato com tamanho de partícula igual		
MÚLTIPLA	Medidas que incluem mais de um tipo de fator ambiental	-	Índice de diversidade de Simpson Eixo 1 de PCA		

Os fatores ambientais mais avaliados em termos de heterogeneidade ambiental incluíram substratos artificiais (25,97 %), substratos naturais (22,34 %), vegetação aquática (14,81 %), detritos de madeira (7,27 %) e medidas de fluxo de água (4,16 %) (Figura 4). Todos esses fatores ambientais são frequentemente considerados como elementos prioritários no manejo e gestão de recursos hídricos a fim de incrementar a heterogeneidade ambiental (Palmer *et al.*, 2005). Porém o manejo de vegetação ripária, medidas de melhoria de qualidade de água e mudanças na conectividade de riachos são as ações mais frequentes em projetos de restauração de ecossistemas de água doce (Bernhardt *et al.*, 2005; Feio *et al.*, 2021). Assim, recomendamos o manejo de múltiplos fatores ambientais e em diferentes escalas espaciais para que projetos de restauração obtenham maior taxa de sucesso no alcance das metas de gestão e manejo.

Dentre as abordagens mais aplicadas para mensurar a heterogeneidade ambiental em cada teste, cálculos que consideram variações qualitativas de um fator ambiental foram as mais utilizadas (24,16 %), a exemplo de índices de diversidade de tipos de substratos em canal fluvial artificial (Figura 5a). Em seguida, medidas que avaliam a estrutura de um fator ambiental (17,66 %), como estruturas de ramos de folhas de macrófitas (Figura 5b). Em terceiro lugar, medidas sobre a rugosidade de um fator ambiental (16,10 %), incluindo medidas de rugosidade de substratos artificiais para colonização por microalgas em riachos (Figura 5c).

Figura 4: Correlação entre as diferentes abordagens de cálculo de medidas utilizadas para mensurar a heterogeneidade ambiental e os fatores ambientais utilizados como *proxy* de heterogeneidade ambiental em ecossistemas aquáticos de água doce.

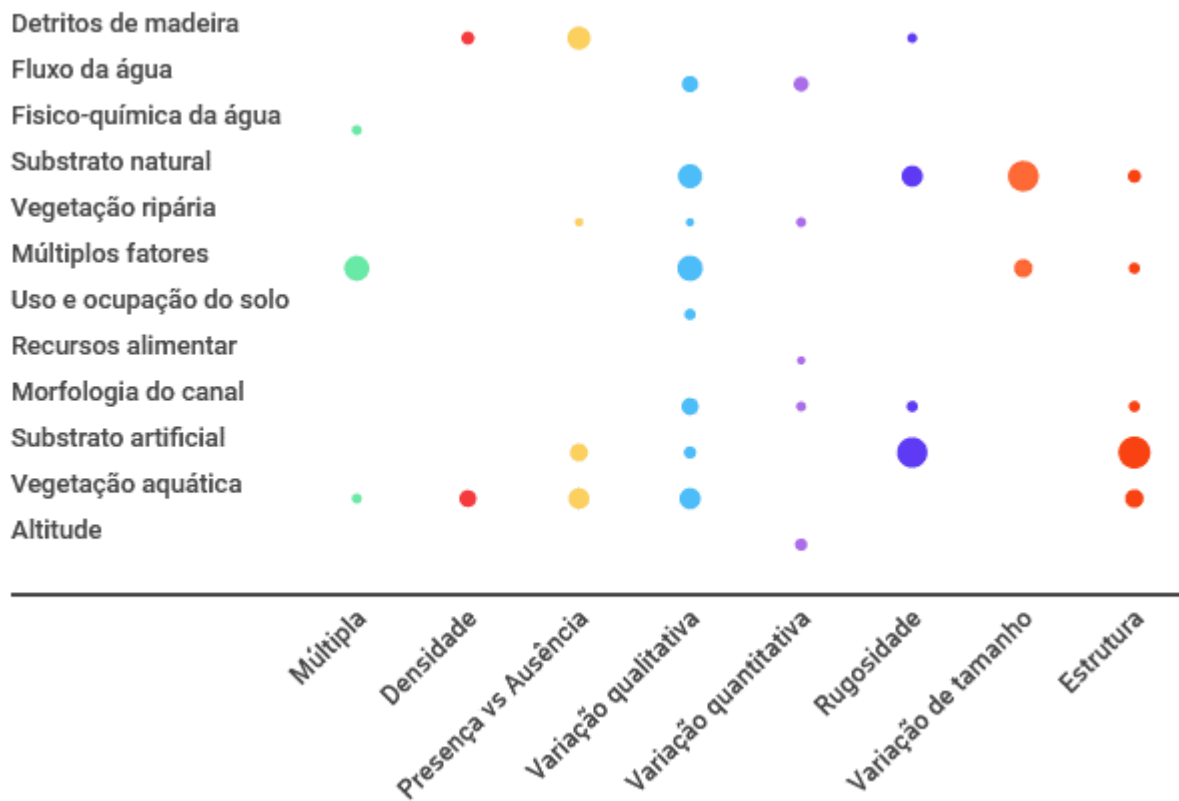
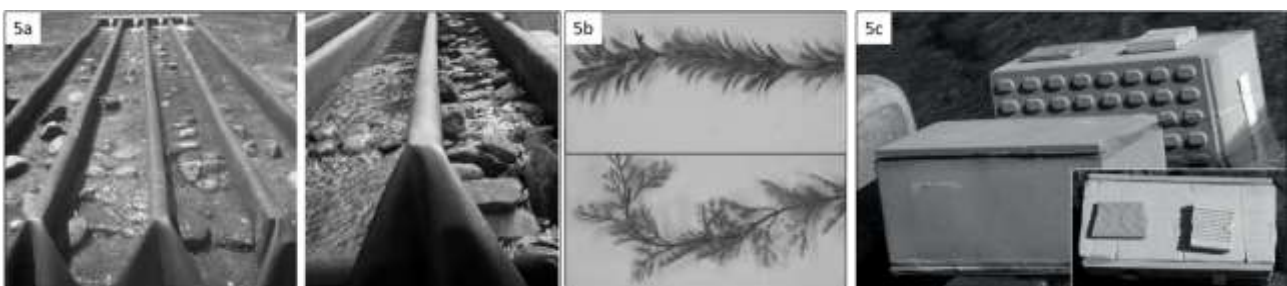


Figura 5: Exemplos de abordagens empregadas em estudos que testaram os efeitos da heterogeneidade ambiental sobre métricas de diversidade biológica em ecossistemas de água doce. 5a) Brown *et al.* (2018); 5b) Ferreiro *et al.* (2013); 5c) Hepp *et al.* (2012).



CONCLUSÕES

A partir dessa revisão sistematizada da literatura internacional podemos destacar que apesar do tema ser estudado desde 1975, a região Afrotropical ainda carece de maior número de evidências para embasar políticas de manejo em ecossistemas de água doce. Além disso, há carência de estudos que considerem os organismos que habitam as zonas planctônicas ou aqueles que estão associados a macrófitas aquáticas. Portanto, projetos voltados à recolonização de organismos nesses compartimentos podem ter alto risco de insucesso.

Por meio dessa revisão, observamos que ainda há ausência de padronização de conceitos e terminologias empregadas em estudos sobre heterogeneidade ambiental em ecossistemas de água doce. Essa inconsistência, provavelmente, deve-se à alta variedade de critérios utilizados para definir, mensurar e quantificar heterogeneidade ambiental. Portanto, reiteramos a necessidade de estabelecimento de bases conceituais e terminologias padronizadas para ampliar a uso de abordagens ecológicas em áreas afins como as engenharias (Palmer *et al.*, 2005).

Como perspectivas futuras, destacamos a necessidade de estudos meta-analíticos que mensurem o tamanho do efeito de heterogeneidade ambiental sobre a biodiversidade em ecossistemas de água doce considerando os diferentes fatores ambientais como moderadores dessa relação. Além disso, o investimento em estudos em mesocosmos deverão contribuir de forma significativa no teste de eficácia de diferentes métodos de incremento de heterogeneidade ambiental, servindo de guia para as futuras ações de manejo e restauração fluvial. Por fim, ressaltamos que as políticas de recuperação e manejo de recursos hídricos devam ocorrer desde a escala local (p.ex.: recuperação de matas ripárias e incremento de heterogeneidade ambiental), até a escala de bacia hidrográfica (p.ex. redução de desmatamento e tratamento de esgotos).

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelos Projetos de Pesquisa & Desenvolvimento da Agência Nacional de Energia Elétrica (CEMIG-ANEEL GT-599, GT-611); Projeto Cemig-Peixe-Vivo; Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG (PPM 00104-18), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (140364/2021-8 para JA, 304060/2020-8 para MC), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES (Código 001). Agradecemos aos colegas do Laboratório de Ecologia de Bentos (DGEE, ICB-UFMG) pelo apoio nas coletas de campo e processamento de amostras biológicas em laboratório.

REFERÊNCIAS

- AGRA, J.; LIGEIRO, R.; HEINO, J.; MACEDO, R.; CASTRO, D.; LINARES, M.; CALLISTO, M. (2020) “*Anthropogenic disturbances alter the relationships between environmental heterogeneity and biodiversity of stream insects.*” *Ecological Indicators*, v. 121.
- ANDERSON, J.; ELLINGSEN, E.; MCARDLE, H. (2006) “*Multivariate dispersion as a measure of beta diversity.*” *Ecology Letters*, v. 9, n. 6, p. 683–693.
- BERNHARDT, S. et al. (2005) “*Synthesizing U.S. River Restoration Efforts.*” *Science*, v. 308, n. April, p. 636–637.
- BROWN, L.; WAHL, C.; SWAN, M. (2018) “*Experimentally disentangling the influence of dispersal and habitat filtering on benthic invertebrate community structure.*” *Freshwater Biology*, v. 63, n. 1, p. 48–61.
- DUDGEON, D. et al. (2006) “*Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges.*” *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society*, v. 81, n. 2, p. 163–82, maio.
- FEIO, J. et al. (2021) “*The biological assessment and rehabilitation of the world’s rivers: An overview.*” *Water (Switzerland)*, v. 13, n. 3, p. 1–6.
- FERREIRO, N.; GIORGI, A.; FEIJÓO, C. (2013) “*Effects of macrophyte architecture and leaf shape complexity on structural parameters of the epiphytic algal community in a Pampean stream.*” *Aquatic Ecology*, v. 47, n. 4, p. 389–401.
- HEPP, L.; LANDEIRO, V.; MELO, A. (2012) “*Experimental Assessment of the Effects of Environmental Factors and Longitudinal Position on Alpha and Beta Diversities of Aquatic Insects in a Neotropical Stream.*” *International Review of Hydrobiology*, v. 97, n. 2, p. 157–167.
- HUTCHINSON, G. (1959) “*Homage to Santa Rosalia or why are there so many kinds of animals?*” *The American Society of Naturalists*, v. 93, n. 870, p. 145–159.
- KORICHEVA, J.; GUREVITCH, J.; MENGERSEN, K. (2013) “*Handbook of Meta-analysis in*

Ecology and Evolution.” Princeton University Press.

KOVALENKO, K.; THOMAZ, S.; WARFE, D. (2012) “*Habitat complexity: approaches and future directions.*” *Hydrobiologia*, v. 685, p. 1–17.

MACARTHUR, R.; MACARTHUR, J. (1961) “*On Bird Species Diversity.*” *Ecology*, v. 42, n. 3, p. 594–598.

ORTEGA, J.; THOMAZ, S.; BINI, L. (2018) “*Experiments reveal that environmental heterogeneity increases species richness, but they are rarely designed to detect the underlying mechanisms.*” *Oecologia*, v. 188, n. 1, p. 11–22.

PALMER, M.; MENNINGER, H.; BERNHARDT, E. (2010) “*River restoration, habitat heterogeneity and biodiversity: A failure of theory or practice?*” *Freshwater Biology*, v. 55, p. 205–222.

PALMER, M.; BERNHARDT, E.; ALLAN, J. (2005) “*Standards for ecologically successful river restoration.*” *Journal of Applied Ecology*, v. 42, p. 208–217.

REID, A. et al. (2019) “*Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity.*” *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society*, v. 94, p. 849–873.

STEIN, A.; KREFT, H. (2015) “*Terminology and quantification of environmental heterogeneity in species-richness research.*” *Biological Reviews*, v. 90, n. 3, p. 815–836.

WANTZEN, K. et al. (2019) “*Urban stream and wetland restoration in the global south-a DPSIR analysis.*” *Sustainability (Switzerland)*, v. 11, n. 18.