

PLANTAS E INSETOS COMO BIOINDICADORES E MACRÓFITAS NA FITORREMEDIAÇÃO DE CONTAMINANTES AQUÁTICOS: REVISÃO INTEGRATIVA ATUALIZADA

Andressa Pilonetto¹, Savania Helen de Lima Rodrigues¹, Maria Claudia Colla Ruvollo-Takasusuki¹, Rosangela Bergamasco¹

¹Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil (pilonettoandressa@gmail.com)

Resumo: Esta revisão sintetiza evidências de 2004 a 2025 sobre plantas e insetos no biomonitoramento e na fitorremediação de contaminantes aquáticos. Macrófitas flutuantes acumulam metais e podem reduzir atrazina, enquanto insetos aquáticos respondem por bioacumulação e mudanças comunitárias. Os resultados reforçam o uso integrado de análises químicas e indicadores biológicos, com protocolos regionais e manejo seguro da biomassa contaminada.

Palavras-chave: Biomonitoramento; Contaminantes emergentes; Macrófitas aquáticas; Insetos aquáticos; Fitorremediação

INTRODUÇÃO

A qualidade dos ecossistemas aquáticos é afetada por fontes pontuais e difusas de contaminação associadas à urbanização, à agricultura, à mineração, à atividade industrial e ao descarte doméstico. Nesse conjunto coexistem poluentes historicamente monitorados, como matéria orgânica, nutrientes e elementos potencialmente tóxicos, e contaminantes de preocupação emergente, entre os quais pesticidas, fármacos, hormônios, produtos de cuidado pessoal e microplásticos (Figura 1). A diversidade química, a ocorrência em misturas e a variação temporal das descargas dificultam a avaliação de risco baseada apenas em amostras isoladas de água ou sedimento (Montagner et al., 2017; Beale et al., 2022).



Figura 1. Principais fontes de contaminação de corpos hídricos, incluindo esgoto doméstico, efluentes industriais, atividades agrícolas, resíduos hospitalares e farmacêuticos, mineração, resíduos sólidos, microplásticos e drenagem urbana. Fonte: Elaboração própria (2026).

A análise físico-química é indispensável para identificar e quantificar substâncias, mas representa uma condição localizada no espaço e no tempo. Pulsos de contaminação podem ser diluídos,

transportados ou depositados antes da coleta, enquanto concentrações inferiores aos limites analíticos podem produzir efeitos crônicos quando a exposição é contínua ou ocorre por meio de misturas. Organismos residentes integram parte dessa exposição ao longo de seu ciclo de vida e, por isso, podem revelar alterações que não são evidentes em uma avaliação química pontual (Burger, 2006; Parmar et al., 2016).

Bioindicadores são organismos, populações, comunidades ou respostas biológicas capazes de sinalizar exposição a contaminantes, efeitos biológicos ou alterações na condição ecológica. O biomonitoramento corresponde ao emprego sistemático desses indicadores em avaliações espaciais ou temporais. As respostas podem ocorrer por bioacumulação de contaminantes nos tecidos, alterações fisiológicas e morfológicas, redução do crescimento ou da sobrevivência, mudanças na riqueza e abundância e substituição de táxons sensíveis por táxons tolerantes. A interpretação torna-se mais robusta quando as informações biológicas são associadas às variáveis ambientais e à caracterização química do meio (Burger, 2006; Parmar et al., 2016; Ouma et al., 2025).

As macrófitas aquáticas são particularmente relevantes porque permanecem associadas ao local amostrado e estabelecem contato direto com a água, o sedimento e a rizosfera. Algumas espécies acumulam metais e compostos orgânicos, apresentam respostas mensuráveis de estresse e possibilitam a retirada física da biomassa contaminada. Essas características sustentam duas aplicações distintas: a bioindicação, quando a planta registra exposição ou efeito biológico, e a fitorremediação, quando existem evidências de redução da concentração ou da disponibilidade do contaminante no compartimento

ambiental. A simples detecção de uma substância nos tecidos vegetais não demonstra, isoladamente, que ocorreu remediação efetiva (Rahman e Hasegawa, 2011; Ali et al., 2020; Nguyen et al., 2021).

Insetos aquáticos e outros macroinvertebrados bentônicos são utilizados principalmente como indicadores da condição ecológica. A composição dessas comunidades responde a alterações na oxigenação, enriquecimento orgânico, estrutura do habitat, condutividade, concentração de nutrientes e presença de pesticidas e metais. Métricas de riqueza, abundância, diversidade, traços funcionais e proporção entre grupos sensíveis e tolerantes permitem comparar diferentes trechos de rios e acompanhar mudanças ao longo do tempo. Estudos de bioacumulação em tecidos ampliam essa aplicação, embora ainda sejam menos frequentes do que as avaliações baseadas na composição das comunidades (Nicacio e Juen, 2015; Miguel et al., 2017; Souto et al., 2019; Tampo et al., 2021).

A literatura recente reforça o potencial de macrófitas flutuantes, especialmente *Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiotes*, *Lemna minor* e espécies de *Salvinia*, tanto como bioindicadoras quanto em processos de fitorremediação de metais e de alguns contaminantes orgânicos. Entre os macroinvertebrados bentônicos, insetos das ordens Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera e Odonata tendem a contribuir para diagnósticos de melhor integridade ecológica, enquanto grupos mais tolerantes, como diversos representantes de Chironomidae, podem aumentar em ambientes enriquecidos ou degradados. Outros macroinvertebrados complementam essa avaliação e permitem integrar indicadores de exposição, de efeitos biológicos e de condição ecológica, conforme representado na Figura 2. Entretanto, essas relações não são universais, pois dependem da espécie, da região biogeográfica, das características do habitat e do tipo e da intensidade da pressão ambiental (Burger, 2006; Parmar et al., 2016; Miguel et al., 2017; Campos et al., 2021; Cortelezzi e Paz, 2023; Monroy-Licht et al., 2024).

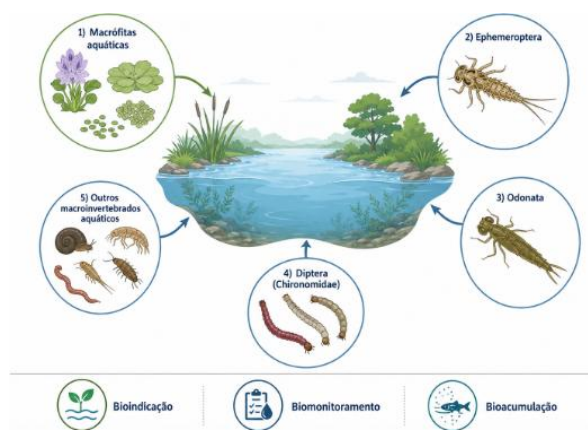


Figura 2. Representação ilustrativa dos principais grupos de bioindicadores abordados na avaliação de ambientes aquáticos, incluindo macrófitas, insetos aquáticos e outros macroinvertebrados bentônicos. Fonte: Elaboração própria (2026).

Na América Latina, a elevada diversidade biológica e o endemismo tornam necessária a calibração regional das métricas de biomonitoramento. A aplicação direta de índices desenvolvidos em regiões temperadas pode reduzir a precisão dos diagnósticos, principalmente quando o conhecimento taxonômico é desigual e os ambientes de referência são pouco representados. A atualização das evidências é, portanto, importante para distinguir usos consolidados de aplicações ainda experimentais e para orientar protocolos que combinem sensibilidade ecológica, viabilidade operacional e segurança no manejo dos organismos e da biomassa contaminada (Cortelezzi e Paz, 2023).

Este trabalho teve como objetivo revisar e atualizar as evidências sobre plantas e insetos empregados como bioindicadores de contaminação em ambientes de água doce, com ênfase no papel das macrófitas aquáticas como bioacumuladoras e fitorremediadoras. Buscou-se, adicionalmente, diferenciar os conceitos de bioindicação, bioacumulação e fitorremediação, sintetizar as principais respostas biológicas utilizadas no biomonitoramento e identificar lacunas relacionadas aos contaminantes emergentes, à validação em condições de campo e à padronização regional dos métodos.

MATERIAL E MÉTODOS

Foi realizada uma revisão integrativa com síntese narrativa, construída em duas etapas. A primeira correspondeu ao levantamento do manuscrito original, que reuniu publicações de 2004 a 2024 nas bases Scopus, SciELO, Google Acadêmico, ScienceDirect, Portal de Periódicos CAPES e Science.gov. A segunda etapa utilizou o relatório de pesquisa complementar previamente produzido no Consensus, com estudos publicados até 2025, para atualizar as evidências sobre contaminantes



aquáticos, macrófitas fitorremediadoras e insetos biomonitores.

As estratégias de busca combinaram os descritores em inglês “biomonitoring”, “bioindicators”, “ecosurveillance”, “aquatic insects”, “macrophytes”, “phytoremediation”, “heavy metals”, “emerging contaminants”, “pesticides” e “microplastics”. Os termos foram empregados isoladamente e em associações com operadores booleanos, priorizando trabalhos em português, inglês ou espanhol e estudos referentes a ambientes de água doce.

Foram considerados elegíveis artigos originais, revisões e trabalhos acadêmicos que apresentassem: a) organismo, comunidade ou grupo taxonômico identificável; b) contaminante, gradiente de pressão antrópica ou variável de qualidade da água; c) resposta biológica ou química mensurável; e d) interpretação associada à exposição, ao efeito ecológico, à bioacumulação ou à remoção do contaminante. Foram excluídos textos sem informação metodológica suficiente, duplicações evidentes e estudos exclusivamente marinhos quando não contribuíam para a discussão conceitual.

A extração foi organizada em planilha conceitual com os campos: autor e ano; país ou contexto regional; organismo; grupo taxonômico; contaminante ou pressão; tipo de ambiente; desenho do estudo; resposta avaliada; resultado principal; categoria de bioindicação; evidência de fitorremediação; e limitação de extrapolação. Para as plantas, foram separadas evidências de acumulação, tolerância ou estresse e redução da concentração no meio. Para os insetos, foram diferenciadas respostas comunitárias, índices bióticos, traços funcionais, biomarcadores e concentração em tecidos.

A análise comparou a força inferencial dos desenhos. Ensaio controlado foram utilizados para discutir dose, tolerância e eficiência potencial; estudos de campo, para avaliar exposição e resposta em condições ambientais reais; e revisões, para identificar convergências e lacunas. A síntese foi qualitativa, sem meta-análise, porque os trabalhos diferiam quanto às espécies, concentrações, duração, unidades de medida, compartimentos ambientais e métodos de amostragem.

O levantamento original não registrou o número total de resultados, a remoção formal de duplicatas nem os motivos de exclusão em cada etapa. Assim, o trabalho não é apresentado como revisão sistemática exaustiva e não utiliza fluxograma PRISMA. A descrição transparente dessa limitação evita quantificações artificiais e permite que as conclusões sejam interpretadas como síntese integrativa das evidências disponíveis no conjunto consultado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Contaminantes e bases da bioindicação

A evidência reunida é mais consistente para elementos potencialmente tóxicos e poluição convencional do que para a ampla variedade de contaminantes emergentes. Cobre, cádmio, chumbo, cromo, arsênio, zinco e níquel aparecem com frequência em estudos de acumulação vegetal, sedimento e macroinvertebrados. Nutrientes, esgoto tratado, matéria orgânica e condutividade são avaliados principalmente por alterações na composição de comunidades. Entre contaminantes emergentes, a atualização forneceu evidência direta mais clara para atrazina e microplásticos, enquanto fármacos, hormônios e produtos de cuidado pessoal permanecem representados sobretudo em revisões gerais (Campos et al., 2021; Rozman et al., 2022; Monroy-Licht et al., 2024; Ouma et al., 2025).

Essa distribuição da literatura exige cuidado terminológico. Metais não são contaminantes emergentes no sentido cronológico, embora continuem prioritários por persistência, toxicidade e bioacumulação. Herbicidas de uso atual, microplásticos e moléculas farmacêuticas podem ser classificados como contaminantes de preocupação emergente porque seu monitoramento regulatório, comportamento ambiental ou efeitos de longo prazo ainda são incompletamente compreendidos. Reunir todas essas classes sob uma única categoria pode ocultar diferenças de persistência, mobilidade, mecanismo de toxicidade e possibilidade de degradação.

Três categorias de bioindicação são úteis para interpretar os estudos. Indicadores de exposição registram a presença ou a disponibilidade do contaminante, como a concentração de metal em raízes ou em tecidos de insetos. Indicadores de efeito mostram alterações fisiológicas, morfológicas ou de desempenho, como redução de crescimento, clorose, deformidades ou mortalidade. Indicadores de condição ecológica integram múltiplas pressões por meio da estrutura da comunidade, da diversidade e de índices de tolerância. Um mesmo organismo pode participar de mais de uma categoria, mas a inferência deve corresponder ao tipo de dado obtido.

A fitorremediação demanda um critério adicional: é necessário demonstrar redução da concentração ou da carga do contaminante no meio, estabilização relevante ou transformação para forma menos disponível, considerando tempo de exposição e biomassa produzida. Valores elevados no tecido podem indicar apenas bioacumulação localizada. Sem colheita e destinação da biomassa, parte do contaminante pode retornar ao sistema pela senescência e decomposição. Portanto, o desempenho deve ser avaliado por balanço de massa, fatores de bioacumulação e translocação, saúde da planta e



destino pós-tratamento (Rahman e Hasegawa, 2011; Souza e Silva, 2019; Ali et al., 2020).

Macrófitas aquáticas como bioindicadoras e fitorremediadoras

Macrófitas flutuantes apresentam vantagens operacionais: rápido crescimento, grande área de contato com a água, raízes capazes de reter partículas e íons e facilidade relativa de colheita. A acumulação costuma ser maior nas raízes do que nas folhas, o que favorece a rizofiltração e reduz a translocação para tecidos aéreos. Entretanto, o desempenho varia com pH, temperatura, concentração, tempo de contato, especiação química, competição entre elementos, disponibilidade de nutrientes e condição fisiológica da planta (Ali et al., 2020; Nguyen et al., 2021).

Eichhornia crassipes permanece como a espécie mais recorrente na literatura. Revisões recentes descrevem remoção de metais, nutrientes, corantes, pesticidas e outros poluentes em águas residuárias, mas a eficiência não é uniforme entre estudos. Em campo, a concentração de Cd, Co, Cr e Pb em pecíolos coletados no rio Orontes demonstrou que a espécie registra exposição real, reforçando sua utilidade como bioacumuladora. Esse tipo de resultado, contudo, não quantifica quanto contaminante foi retirado do rio nem elimina a necessidade de amostragem da água e do sedimento (Monroy-Licht et al., 2024; Yalcin et al., 2025).

Em ensaio com atrazina, *E. crassipes*, *P. stratiotes* e *Salvinia minima* reduziram o herbicida em concentrações de até 20 µg L⁻¹. *E. crassipes* apresentou a maior redução nas condições avaliadas, mas a tolerância foi espécie-específica: concentrações mais elevadas provocaram mortalidade em *E. crassipes* e *S. minima*, enquanto *P. stratiotes* suportou exposição superior. O resultado demonstra que eficiência e tolerância não são equivalentes e que a seleção da espécie deve considerar a faixa de contaminação esperada (Ramírez Hernandez et al., 2025).

Pistia stratiotes mostrou desempenho expressivo na remoção de Pb e Cd em soluções preparadas durante 28 dias. As duas macrófitas avaliadas, *P. stratiotes* e *E. crassipes*, acumularam metais, apresentaram maior concentração nas raízes e reduziram a concentração na solução; *P. stratiotes* alcançou remoção significativamente superior nas condições experimentais. Como o estudo foi conduzido em solução controlada, a aplicação em rios e reservatórios requer validação diante de sedimentos, matéria orgânica dissolvida, competição iônica e variações hidrológicas (Maurya et al., 2025).

Espécies de *Salvinia*, *Lemna* e *Azolla* ampliam as opções de monitoramento. Em área influenciada por fundição de cobre, quatro macrófitas flutuantes

apresentaram padrões distintos de acumulação de macro e microelementos, mostrando que a escolha do táxon altera a sensibilidade e a interpretação do diagnóstico. Estudos comparativos são especialmente importantes quando diferentes espécies coexistem, pois a ausência de acumulação em uma planta não significa ausência de biodisponibilidade para todas as demais (Polechońska et al., 2022).

Lemna minor é adequada a bioensaios por seu pequeno porte, reprodução rápida e respostas mensuráveis de crescimento e pigmentos. A exposição prolongada a microplásticos de polietileno não causou colapso da biomassa nas condições experimentais, e partículas aderiram à superfície vegetal. Esse resultado sugere potencial para coleta de partículas flutuantes, mas deve ser interpretado como retenção ou bioadesão, e não como degradação do plástico. A estabilidade da adesão, a influência de biofilmes, a hidrodinâmica e a destinação da biomassa ainda limitam a extrapolação para remediação em escala ambiental (Rozman et al., 2022).

As respostas de estresse complementam a análise de concentração. Inibição do crescimento, redução de raízes, clorose, alterações de pigmentos e ativação antioxidante indicam que a planta percebe o contaminante, mas respostas severas podem reduzir a capacidade de remoção ao limitar a produção de biomassa. Mecanismos hormonais e de quelatação ajudam a explicar tolerância e compartimentalização de metais, porém ainda faltam dados padronizados que conectem mecanismos fisiológicos a desempenho de campo (Nguyen et al., 2021).

O uso de macrófitas deve considerar risco ecológico. *E. crassipes*, *P. stratiotes* e algumas *Salvinia* podem apresentar crescimento invasivo, reduzir oxigenação, alterar fluxo e sombrear a coluna d'água. A introdução deliberada em locais onde não são nativas não é recomendável sem avaliação de risco e contenção. A alternativa mais segura é priorizar espécies locais ou sistemas construídos e controlados, com densidade definida, colheita periódica e barreiras que impeçam dispersão.

A biomassa contaminada constitui etapa crítica do processo. Material vegetal enriquecido com metais ou compostos persistentes não deve retornar ao corpo hídrico nem ser utilizado diretamente como alimento, fertilizante ou composto orgânico. A destinação deve seguir a caracterização do resíduo e pode envolver secagem, estabilização, recuperação de elementos, tratamento térmico ou disposição adequada. Sem esse planejamento, a fitorremediação apenas transfere o contaminante da água para um resíduo biológico.

Em síntese, a evidência é forte para o uso de macrófitas como indicadores de exposição e promissora para fitorremediação em sistemas



controlados. A efetividade em corpos d'água abertos é mais incerta, porque a taxa de entrada do contaminante, a renovação da água e a heterogeneidade ambiental podem superar a capacidade de remoção. Protocolos de campo devem medir simultaneamente concentração na água, sedimento e tecido vegetal, biomassa total, taxa de crescimento e redução líquida de carga.

Insetos aquáticos e macroinvertebrados no biomonitoramento

Insetos aquáticos integram condições ambientais ao longo de semanas ou meses e ocupam diferentes níveis tróficos e micro-habitats. A elevada diversidade permite detectar múltiplos tipos de pressão, mas também exige conhecimento taxonômico e desenho amostral consistente. As respostas mais utilizadas são riqueza, abundância, composição, diversidade, grupos funcionais e índices de tolerância. A bioacumulação em tecidos oferece informação adicional sobre exposição a metais, embora dependa de tamanho, dieta, estágio de vida e contato com sedimento (Souto et al., 2019; Tampo et al., 2021).

As ordens Ephemeroptera, Plecoptera e Trichoptera formam o conjunto EPT, empregado como indicador de melhor condição ecológica em muitos programas. Em geral, maior riqueza de EPT está associada a oxigênio dissolvido mais alto, menor enriquecimento orgânico e habitat mais preservado. Entretanto, algumas famílias e gêneros são mais tolerantes do que outros, e a interpretação baseada apenas no nível de ordem pode ocultar respostas importantes. Métricas como EPT/Chironomidae, BMWP e ASPT devem ser calibradas para a fauna e as condições de referência da região (Tampo et al., 2021; Ouma et al., 2025).

Em riachos do Cerrado brasileiro, conjuntos de macroinvertebrados e diatomáceas responderam ao uso do solo, ao aporte de esgoto tratado, a nitrato, fosfato e condutividade. Famílias de EPT estiveram mais associadas a condições naturais, enquanto Oligochaeta e Hirudinea acompanharam maior perturbação. O estudo mostra que o sinal biológico não representa um único contaminante, mas a combinação de qualidade da água e integridade do habitat (Campos et al., 2021).

Odonata apresenta valor adicional por integrar a fase larval aquática e a fase adulta terrestre. A composição das comunidades responde a cobertura ripária, estrutura do habitat, temperatura, oxigenação e intensidade de uso do solo. Em ambientes neotropicais, traços funcionais das larvas e diferenças entre Zygoptera e Anisoptera ajudam a interpretar a perturbação, mas a resposta depende da escala espacial e da disponibilidade de micro-habitats (Miguel et al., 2017; Silva et al., 2021).

Dípteros, principalmente Chironomidae, incluem organismos capazes de persistir sob baixa oxigenação e alto teor de matéria orgânica. A abundância elevada de táxons tolerantes pode indicar degradação, enquanto deformidades em estruturas larvais e alterações de composição têm sido associadas a estressores químicos. Ao mesmo tempo, Chironomidae é um grupo diverso, com espécies de diferentes tolerâncias; por isso, tratá-lo como bloco homogêneo reduz a resolução ecológica (Moraes et al., 2010; Nicacio e Juen, 2015).

Hemípteros aquáticos são menos incorporados aos protocolos de rotina, apesar de sua ampla distribuição. Revisão de estudos laboratoriais e de campo identificou respostas a pesticidas e potencial de alguns táxons como sentinelas de cádmio, eutrofização e salinização. A evidência ainda é desigual e não permite generalizações para todas as famílias, mas indica oportunidade para ampliar o conjunto de organismos utilizados no biomonitoramento (Bakonyi et al., 2022).

A análise de metais em insetos pode complementar a química do sedimento. Em córregos de Cerrado, Cu, Mn e Zn foram detectados em grupos tróficos, com diferenças de acumulação relacionadas à guilda; Cd não foi detectado na fauna no conjunto analisado. Esses resultados mostram que ausência no tecido pode refletir baixa biodisponibilidade, eliminação ou limite analítico, e não necessariamente ausência no sedimento. A interpretação deve considerar fatores de bioacumulação e ecologia alimentar (Souto et al., 2019).

Em região de mineração no Cinturão de Cobre da África Central, diversidade e distribuição de macroinvertebrados foram influenciadas por Cu, condutividade, velocidade da água, textura do sedimento e matéria orgânica. Índices de habitat e presença de famílias sensíveis indicaram condição ecológica relativamente boa, apesar de contaminação metálica moderada. O caso evidencia que índices bióticos e concentrações químicas podem produzir mensagens complementares, e não necessariamente idênticas (Ouma et al., 2025).

Ferramentas moleculares podem aumentar a resolução e reduzir limitações de identificação. O metabarcoding de DNA ambiental detectou aproximadamente o dobro de famílias e gêneros de insetos em comparação à amostragem convencional no estudo analisado, com ganho particular para Diptera e Hemiptera. Índices derivados de dados moleculares correlacionaram-se com nitrogênio total, mostrando potencial para avaliação ambiental. Ainda assim, bancos de referência incompletos, detecção de DNA transportado e ausência de informação direta sobre abundância exigem validação conjunta com amostragens tradicionais (Uchida et al., 2020).



A aplicação na América Latina requer índices locais. Revisão regional mostrou predomínio de índices estrangeiros adaptados e menor proporção de ferramentas desenvolvidas localmente. A alta diversidade neotropical, a existência de táxons endêmicos e a desigualdade de capacidade taxonômica limitam a transferência automática de valores de tolerância. Programas brasileiros devem combinar protocolos comparáveis, coleções de referência, formação taxonômica e validação em gradientes ambientais representativos (Cortelezzi e Paz, 2023).

Limitações da utilização do biomonitoramento

Nenhum indicador isolado distingue de forma inequívoca todas as causas de degradação. Redução de EPT, aumento de Chironomidae ou clorose em macrófitas podem ocorrer por diferentes combinações de oxigênio, nutrientes, temperatura, sedimento fino, toxicidade e alteração de habitat. O desenho mais robusto integra química da água e do sedimento, habitat físico, hidrologia, bioacumulação e estrutura de comunidades, além de pontos de referência e séries temporais.

A escolha do organismo deve corresponder à pergunta. Para localizar exposição a metais, tecidos de macrófitas e insetos residentes podem ser úteis. Para avaliar condição ecológica, comunidades bentônicas e métricas multivariadas são mais adequadas. Para testar remediação, são necessários controles, concentração inicial e final, massa de contaminante retirada, biomassa e destino do resíduo. Confundir essas finalidades leva a conclusões exageradas sobre eficiência ou causalidade.

A principal lacuna temática envolve contaminantes emergentes além de herbicidas e microplásticos. A literatura atualizada contém evidência experimental para atrazina e interação entre *L. minor* e microplásticos, mas é menos consistente para fármacos, hormônios, disruptores endócrinos e produtos de cuidado pessoal em condições de campo. Estudos futuros devem trabalhar com misturas ambientalmente realistas, baixas concentrações crônicas e produtos de transformação.

Outra lacuna é a validação de longo prazo. Muitos estudos de fitorremediação utilizam soluções preparadas, exposição curta e condições estáveis. Rios, lagos e efluentes reais apresentam renovação, sazonalidade, matéria orgânica, sedimentos e organismos competidores. Ensaios em mesocosmos e áreas piloto devem preceder aplicações abertas, com monitoramento de recuperação ecológica e risco de invasão.

Para insetos, a prioridade é ampliar resolução taxonômica sem comprometer viabilidade operacional. Protocolos em nível de família são úteis

para triagem, mas podem ocultar espécies com tolerâncias distintas. Abordagens integradas, combinando morfologia, DNA ambiental e traços funcionais, podem melhorar a detecção, desde que os bancos genéticos e os valores de tolerância sejam desenvolvidos para a fauna regional (Uchida et al., 2020; Cortelezzi e Paz, 2023).

Também são necessários critérios mínimos para relatar fitorremediação: identificação taxonômica confirmada, concentração e especiação do contaminante, duração, biomassa inicial e final, fator de bioacumulação, fator de translocação, taxa de remoção, controles sem plantas, balanço de massa e plano de destinação. A adoção desses critérios facilitaria comparações e evitaria que simples acumulação fosse apresentada como limpeza ambiental.

Uma estratégia operacional aplicável a programas de monitoramento inclui: seleção de locais de referência e impactados; coleta simultânea de água, sedimento, macrófitas e macroinvertebrados; medição de variáveis físico-químicas; identificação de táxons e respostas de tecido; integração estatística; e reavaliação periódica. A combinação de indicadores de exposição, efeito e condição ecológica aumenta a capacidade de detectar mudanças e de avaliar o sucesso de medidas de manejo.

A ecovigilância baseada em organismos deve ser vista como complemento, e não substituto, da química analítica. Seu maior valor é registrar a fração biodisponível e as consequências biológicas da exposição. Quando os resultados convergem, a confiança no diagnóstico aumenta; quando divergem, a diferença pode revelar pulsos de contaminação, recuperação parcial, baixa biodisponibilidade ou atraso na resposta da comunidade.

CONCLUSÃO

Plantas e insetos oferecem informações complementares para o diagnóstico de ecossistemas aquáticos. Macrófitas flutuantes são bons indicadores de exposição e apresentam potencial de fitorremediação, especialmente para elementos potencialmente tóxicos e, em evidências recentes, para atrazina. Entretanto, a eficiência depende da espécie, da concentração, das condições ambientais, da colheita e da destinação segura da biomassa. Para microplásticos, a adesão a *Lemna minor* é promissora, mas ainda não comprova remediação efetiva em campo.

Insetos aquáticos são mais consolidados como indicadores de condição ecológica. Métricas baseadas em EPT, Odonata, Chironomidae e outros grupos respondem a gradientes de qualidade da água e alteração de habitat, enquanto análises de tecido podem complementar a detecção de metais. A



interpretação exige resolução taxonômica adequada e calibração regional, sobretudo em bacias neotropicais.

A aplicação mais confiável é integrada: química de água e sedimento, bioacumulação, respostas fisiológicas e estrutura de comunidades. As prioridades de pesquisa incluem contaminantes emergentes em baixas concentrações, misturas, estudos de longo prazo, índices latino-americanos, validação molecular e protocolos padronizados de fitorremediação.

REFERÊNCIAS

ALI, S.; ABBAS, Z.; RIZWAN, M.; ZAHEER, I. E.; YAVAS, I.; ÜNAY, A.; ABDEL-DAIM, M. M.; BIN-JUMAH, M.; HASANUZZAMAN, M.; KALDERIS, D. Application of floating aquatic plants in phytoremediation of heavy metals polluted water: a review. *Sustainability*, v. 12, n. 5, art. 1927, 2020. DOI: 10.3390/su12051927.

BAKONYI, G.; VÁSÁRHELYI, T.; SZABÓ, B. Pollution impacts on water bugs (Nepomorpha, Gerromorpha): state of the art and their biomonitoring potential. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 194, art. 301, 2022. DOI: 10.1007/s10661-022-09961-2.

BEALE, D. J.; JONES, O. A. H.; BOSE, U.; BROADBENT, J. A.; WALSH, T. K.; VAN DE KAMP, J.; BISSETT, A. Omics-based ecosurveillance for the assessment of ecosystem function, health, and resilience. *Emerging Topics in Life Sciences*, v. 6, n. 2, p. 185-199, 2022. DOI: 10.1042/ETLS20210261.

BURGER, J. Bioindicators: a review of their use in the environmental literature 1970-2005. *Environmental Bioindicators*, v. 1, n. 2, p. 136-144, 2006. DOI: 10.1080/15555270600701540.

CAMPOS, C. A.; KENNARD, M. J.; GONÇALVES JÚNIOR, J. F. Diatom and macroinvertebrate assemblages to inform management of Brazilian savanna's watersheds. *Ecological Indicators*, v. 128, art. 107834, 2021. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107834.

CORTELEZZI, A.; PAZ, L. E. Macroinvertebrate biomonitoring in Latin America: progress and challenges. *Freshwater Science*, v. 42, n. 2, p. 204-213, 2023. DOI: 10.1086/724732.

MAURYA, N. K.; SHIVAKUMAR, M.; BHOOLESHWARI; SAMAL, K.; JAYASWAL, R.; LAKSHMIPATHI, M. T.; KUMAR, V.; ANNAPPA SWAMY, T. S. Phytoremediation of metal contamination: evaluating *Pistia stratiotes* and *Eichhornia crassipes* for lead and cadmium removal. *International Journal of Environment and Climate*

Change, v. 15, n. 4, p. 205-221, 2025. DOI: 10.9734/ijec/2025/v15i44804.

MIGUEL, T. B.; OLIVEIRA-JUNIOR, J. M. B.; LIGEIRO, R.; JUEN, L. Odonata (Insecta) as a tool for the biomonitoring of environmental quality. *Ecological Indicators*, v. 81, p. 555-566, 2017. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.06.010.

MONROY-LICHT, A.; CARRANZA-LOPEZ, L.; DE LA PARRA-GUERRA, A. C.; ACEVEDO-BARRIOS, R. Unlocking the potential of *Eichhornia crassipes* for wastewater treatment: phytoremediation of aquatic pollutants, a strategy for advancing Sustainable Development Goal-06 clean water. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 31, p. 43561-43582, 2024. DOI: 10.1007/s11356-024-33698-9.

MONTAGNER, C. C.; VIDAL, C.; ACAYABA, R. D. Emerging contaminants in aquatic matrices from Brazil: current scenario and analytical, ecotoxicological and legislative aspects. *Química Nova*, v. 40, n. 9, p. 1094-1110, 2017.

MORAIS, S. S.; MOLOZZI, J.; VIANA, A. L.; VIANA, T. H.; CALLISTO, M. Diversity of larvae of littoral Chironomidae (Diptera: Insecta) and their role as bioindicators in urban reservoirs of different trophic levels. *Brazilian Journal of Biology*, v. 70, n. 4, p. 995-1004, 2010.

NGUYEN, T. Q.; SESIN, V.; KISIALA, A.; EMERY, R. J. N. Phytohormonal roles in plant responses to heavy metal stress: implications for using macrophytes in phytoremediation of aquatic ecosystems. *Environmental Toxicology and Chemistry*, v. 40, n. 1, p. 7-22, 2021. DOI: 10.1002/etc.4909.

NICACIO, G.; JUEN, L. Chironomids as indicators in freshwater ecosystems: an assessment of the literature. *Insect Conservation and Diversity*, v. 8, n. 5, p. 393-403, 2015. DOI: 10.1111/icad.12123.

OUMA, K. O.; SHANE, A.; MONDE, C.; SYAMPUNGANI, S. Benthic macroinvertebrates as bioindicators of stream health within the Central African Copperbelt. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 236, art. 443, 2025. DOI: 10.1007/s11270-025-08004-z.

PARMAR, T. K.; RAWTANI, D.; AGRAWAL, Y. K. Bioindicators: the natural indicator of environmental pollution. *Frontiers in Life Science*, v. 9, n. 2, p. 110-118, 2016. DOI: 10.1080/21553769.2016.1162753.

POLECHONSKA, L.; SZCZĘŚNIAK, E.; KLINK, A. Comparative analysis of trace and macro-element bioaccumulation in four free-floating macrophytes in area contaminated by copper smelter. *International*



Journal of Phytoremediation, v. 24, n. 3, p. 324-333, 2022. DOI: 10.1080/15226514.2021.1937932.

RAHMAN, M. A.; HASEGAWA, H. Aquatic arsenic: phytoremediation using floating macrophytes. *Chemosphere*, v. 83, n. 5, p. 633-646, 2011. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2011.02.045.

RAMÍREZ HERNANDEZ, M. C.; BANDEIRA, J. N.; ALPALA, D. A. R.; BATISTA, L. P.; ARAÚJO, M. A. S.; CHAGAS, P. D. S. F.; SILVA, D. V.; DE MORAIS, E. R. C. Aquatic macrophytes in the remediation of atrazine in water: a study on herbicide tolerance and degradation using *Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiotes*, and *Salvinia minima*. *ACS Omega*, v. 10, p. 11264-11273, 2025. DOI: 10.1021/acsomega.4c10903.

ROZMAN, U.; JEMEC KOKALJ, A.; DOLAR, A.; DROBNE, D.; KALČÍKOVÁ, G. Long-term interactions between microplastics and floating macrophyte *Lemna minor*: the potential for phytoremediation of microplastics in the aquatic environment. *Science of the Total Environment*, v. 831, art. 154866, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154866.

SILVA, L. F. R.; CASTRO, D. M. P.; JUEN, L.; CALLISTO, M.; HUGHES, R. M.; HERMES, M. G. Functional responses of Odonata larvae to human disturbances in neotropical savanna headwater streams. *Ecological Indicators*, v. 133, art. 108367, 2021. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108367.

SOUTO, R. M. G.; CORBI, J. J.; JACOBUCCI, G. B. Aquatic insects as bioindicators of heavy metals in sediments in Cerrado streams. *Limnetica*, v. 38, n. 2, p. 575-586, 2019. DOI: 10.23818/limn.38.33.

SOUZA, C. B.; SILVA, G. R. Phytoremediation of effluents contaminated with heavy metals by floating aquatic macrophytes species. In: JACOB-LOPES, E.; QUEIROZ, M. I.; ZEPKA, L. Q. (ed.). *Biotechnology and Bioengineering*. London: IntechOpen, 2019. DOI: 10.5772/intechopen.83645.

TAMPO, L.; KABORÉ, I.; ALHASSAN, E. H.; OUÉDA, A.; BAWA, L. M.; DJANEYE-BOUNDJOU, G. Benthic macroinvertebrates as ecological indicators: their sensitivity to the water quality and human disturbances in a tropical river. *Frontiers in Water*, v. 3, art. 662765, 2021. DOI: 10.3389/frwa.2021.662765.

UCHIDA, N.; KUBOTA, K.; AITA, S.; KAZAMA, S. Aquatic insect community structure revealed by eDNA metabarcoding derives indices for environmental assessment. *PeerJ*, v. 8, e9176, 2020. DOI: 10.7717/peerj.9176.

YALCIN, I. E.; ALTAY, V.; OZTURK, M. Phytoremediation potential and ecophysiological features of water hyacinth *Eichhornia crassipes*: a

case study from Orontes River, Türkiye. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, v. 60, n. 2, p. 66-78, 2025. DOI: 10.1080/10934529.2025.2497650