

Bivalves como biomonitores ambientais: uma revisão de literatura

Bivalves as environmental biomonitors: a literature review

Dayvison Felismindo Lima ^{1*}, Ana Paula Madeira Di Benedetto ¹,
Roberto Weider de Assis Franco ¹

RESUMO

Os bivalves são filtradores, bentônicos, em sua maioria sésseis, e durante seu ciclo de vida podem acumular substâncias presentes na água, independente da importância nutricional. Essas características fazem com que os bivalves sejam muito utilizados como biomonitores ambientais. Este trabalho apresenta revisão de literatura (2016-2021) sobre a utilização dos bivalves como biomonitores ambientais. Além de diagnósticos sobre a presença de substâncias contaminantes no ambiente (metais, semimetais, poluentes orgânicos persistentes, componentes farmacêuticos, e microplásticos), o biomonitoramento ambiental por meio de bivalves permite avaliar alterações de parâmetros da água, tais como alcalinidade e temperatura. A análise da literatura disponível revelou que a viabilidade de utilização desses animais no monitoramento ambiental depende dos fatores a serem monitorados e da espécie selecionada.

Palavras-chave: Moluscos; Mudanças ambientais; Monitoramento.

ABSTRACT

Bivalves are filter feeders, benthic, mostly sessile, and during their life cycle they can accumulate substances present in water, regardless of nutritional importance. These characteristics make bivalves widely used as environmental biomonitors. This work presents a literature review (2016-2021) on the use of bivalves as environmental biomonitors. In addition to diagnosing the presence of polluting substances in the environment (metals, semimetals, persistent organic pollutants, pharmaceutical components, and microplastics), environmental biomonitoring using bivalves makes it possible to evaluate changes in water parameters, such as alkalinity and temperature. The analysis of the available literature revealed that the feasibility of using these animals in environmental monitoring depends on the factors to be monitored and the species selected.

Keywords: Molluscs; Environmental changes; Monitoring.

¹ Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

*E-mail: lima@pq.uenf.br

INTRODUÇÃO

A classe Bivalvia é representada por amêijoas, mexilhões, ostras e vieiras, constituindo a segunda maior classe do filo Mollusca quanto a diversidade de espécies. Há representantes nos ecossistemas marinho (80% das espécies) e de água doce. Estes moluscos são filtradores, bentônicos, em sua maioria sésseis, e em seu habitat participam da ciclagem de nutrientes e são elos da base das cadeias e teias alimentares (GOSLING, 2015).

A filtração alimentar mantém os bivalves em constante contato físico e metabólico com a água, o que lhes confere a capacidade de acumular vários tipos de substâncias presentes no ambiente, independente da sua importância nutricional para o animal. Além disso, os bivalves têm elevada plasticidade, se adaptando às variações ambientais. A alimentação filtradora e o hábito sésseis, aliados a elevada tolerância dos bivalves à presença de contaminantes e a sua fácil amostragem, fazem com que sejam muito utilizados como biomonitores ambientais (e.g., BEYER et al., 2017; ŚWIACKA et al., 2019). Há mais de 50 anos os bivalves são utilizados como organismos-sentinela, e os primeiros estudos utilizando esses animais como biomonitores datam das décadas de 1960 e 1970 (GOLDBERG, 1975).

O diagnóstico da presença de poluentes no ambiente pode ser feito pela análise de biomarcadores de resposta fisiológica, celular, bioquímica ou molecular do bivalve. Biomarcadores de estresse oxidativo, tais como as enzimas glutathione S-transferase (GST), catalase (CAT), glutathione peroxidase (GPx), citocromo P4501A, malondialdeído e níveis reduzidos/oxidados de glutathione, podem ser alterados quantitativamente pela exposição a poluentes. O estresse oxidativo é uma resposta adversa a nível celular e tecidual a uma variedade de contaminantes. Outros exemplos de biomarcadores são: i) atividade da acetilcolinesterase (AChE), enzima que hidrolisa neurotransmissores inibidos pela exposição a pesticidas carbamatos e organofosforados; ii) metalotioneínas (MTs), proteínas que são induzidas na exposição a determinados metais (e.g., Cd, Hg); e iii) indução de enzimas de reparo de DNA, que refletem a exposição e os efeitos genotóxicos (HOOK et al., 2014). Uma limitação do uso de biomarcadores na avaliação da presença de poluentes é que diferentes estressores podem causar a mesma alteração na resposta de um biomarcador. Assim, nem sempre é possível identificar a origem do estresse, e muitas vezes há vários estressores presentes. Portanto, o seu uso no estudo de poluentes deve ser acompanhado de outras análises (HOOK et al., 2014).

O objetivo deste trabalho é realizar uma revisão da literatura recente (2016-2021) que destaca a utilização dos moluscos bivalves como organismos-sentinela na avaliação de alterações em ambientes marinhos, apresentando os principais contaminantes e alterações que podem ser monitoradas por esses animais.

METODOLOGIA

Este trabalho avaliou artigos científicos publicados em periódicos indexados e revisados por pares entre janeiro de 2016 e julho de 2021, que abordaram a utilização de bivalves no monitoramento ambiental. A base de busca bibliográfica utilizada foi Scopus (<https://www.scopus.com/home.uri>), pois é atualizada diariamente. Os cruzamentos de palavras-chave (em inglês) utilizados foram ‘bivalve AND bioindicator’; ‘bivalve AND biomonitor’; e ‘bivalve AND monitor AND shell’, que resultaram em 253, 39 e 19 publicações, respectivamente. Dentre as 311 publicações resultantes da busca, foram selecionadas 157 que convergiam com o objetivo deste trabalho, a partir das informações contidas no título e no resumo. No entanto, para a organização do texto do trabalho nem todas as 157 publicações selecionadas estão citadas como referências consultadas. Neste trabalho, optou-se pela apresentação de todos os tipos de biomonitoramento ambiental que utilizam bivalves, trazendo exemplos que constam em parte das publicações selecionadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Biomonitoramento de metais e semimetais

Os metais estão presentes naturalmente no ambiente, ou podem ser lançados no ambiente a partir de fontes antropogênicas. Em relação a presença de metais nos organismos, eles podem ter funções biológicas conhecidas ou não, com variações nos níveis de toxicidade dependendo das concentrações e mecanismos de acumulação, excreção ou detoxificação. Metais como Fe, Cu, Co, Mn e Zn, por exemplo, são essenciais para o metabolismo corporal, mas alguns deles, tais como Cu e Zn, podem causar efeitos prejudiciais quando estão em concentrações elevadas (ROVETA et al., 2021; STREHSE e MASER, 2020). Metais e semimetais, tais como As, Al, Ba, Bi, Cd, Hg, Ni, Pb, Pt e Ag, são exemplos de elementos que não possuem funções biológicas específicas (ROVETA et al., 2021). Esses elementos podem ser poluentes ambientais, dependendo de suas concentrações, e tóxicos para os organismos (OLIVEIRA et al., 2021).

Oliveira et al. (2021) determinaram as concentrações de As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Se, V e Zn no músculo adutor de 30 amostras de mexilhões (*Perna perna*) coletados na Baía de Guanabara, sudeste do Brasil. Todas as amostras de mexilhão excederam o limite permitido pela legislação brasileira para Cr, e 12 amostras excederam o limite de Se. Os valores estimados de ingestão diária não ficaram acima dos limites recomendados pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) para nenhum dos elementos avaliados, embora seja importante ressaltar que apenas o músculo adutor foi avaliado.

Na costa da Índia, Hariharan et al. (2016) analisaram amostras de água e de mexilhões *Perna viridis* em dois locais que recebem efluentes industriais, agrícolas e domésticos; e em local preservado. Os autores verificaram que a acumulação de metais no tecido dos mexilhões seguiu a ordem $Zn > Cu > Ni > Cr > Pb > Cd$, com correspondência a concentração na água em cada ponto de coleta. Esses mexilhões também foram avaliados quanto aos níveis de CAT, peroxidação lipídica (LPO), GST e glutathiona reduzida (GSH), com alteração nos indivíduos provenientes dos locais mais poluídos. Isso indica que a absorção de metais pode induzir mudanças biológicas, principalmente nos órgãos internos, o que afeta a saúde dos mexilhões.

Dois estudos utilizando berbigões como biomonitores apresentaram resultados diferentes dos supracitados. O berbigão *Cerastoderma edule* do estuário do Rio Tejo, Portugal, apresentou relação direta entre os níveis de bioacumulação no organismo e os metais detectados no sedimento em duas áreas com diferentes níveis de contaminação (MARQUES et al., 2016). Entretanto, os parâmetros de defesa antioxidante, CAT, GH e superóxido dismutase (SOD) se mostraram inalterados, indicando que o animal possui boa tolerância aos metais. Velez et al. (2016) analisaram indivíduos do berbigão *C. glaucum* coletados em seis áreas na lagoa de Óbidos, Portugal: i) centro da lagoa, ii) local que recebe efluentes agrícolas e urbanos; e iii) região intermediária. Os autores observaram que berbigões de locais com menor nível de contaminação e em áreas mais contaminadas apresentaram níveis de bioacumulação de metais e As mais elevados em comparação aos indivíduos amostrados em áreas com nível de contaminação intermediário. Além disso, os biomarcadores de estresse oxidativo e a concentração total de elementos acumulados por *C. glaucum* apresentaram correlação fraca, refletindo a tolerância desta espécie à contaminação. Estes resultados mostram que, dependendo da

espécie, a bioacumulação em bivalves pode não ter correlação evidente com os elementos disponíveis no ambiente, e nem com os parâmetros de defesa antioxidante.

Biomonitoramento de poluentes orgânicos persistentes (PCBs, HPAs, OCPs e PBDEs)

Os policlorobifenilos (PCBs), também denominados bifenilos policlorados, constituem uma família de compostos aromáticos sintéticos que foram produzidos pela primeira vez em 1929 (BENALI et al., 2017). Devido às suas propriedades físicas e químicas, estes compostos foram amplamente utilizados por mais de 50 anos em agentes de resfriamento, transformadores de capacitores e tintas. Além disso, os PCBs podem ser produzidos de forma involuntária durante a combustão, como no caso da incineração de resíduos médicos e industriais (ANEZAKI et al., 2016).

Os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) também são compostos tóxicos que se originam principalmente da combustão incompleta de combustíveis fósseis e biomassa (HPAs pirolíticos), da maturação lenta da matéria orgânica (HPAs petrogênicos) e da degradação de curto prazo da matéria orgânica. A maioria dos HPAs deriva de fontes antropogênicas, como usinas de aquecimento movidas a carvão, derramamentos de óleo e resíduos industriais e urbanos, alcançando o ambiente marinho (BENALI et al., 2017).

A partir da década de 1940, pesticidas organoclorados (OCPs) começaram a ser amplamente utilizados na agricultura, na indústria pecuária, em programas de combate a insetos transmissores de doenças e em campanhas de saúde pública. Porém, quando os mecanismos de atuação dos OCPs no ambiente e os seus efeitos à saúde humana foram melhor compreendidos pela comunidade científica, passou-se a utilizar outros tipos de inseticidas. Os OCPs foram proibidos na década de 1970. No entanto, na década de 1990 a sua comercialização ainda era permitida em alguns países, como no Brasil, em que a proibição ocorreu em 1985 (aplicações agrícolas) e em 1998 (campanhas de saúde pública) (BARBOZA et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2016). Os estudos sobre os níveis de OCPs no ambiente são prioritários devido a persistência e o risco que representam para o ambiente aquático, mesmo após décadas de proibição (OLIVEIRA et al., 2016). Já os éteres difenílicos polibromados (PBDEs) são compostos que possuem propriedades tóxicas cuja principal fonte para o ambiente são os retardadores de chama adicionados a

vários produtos manufaturados para conter a ignição (VAEZZADEH et al., 2021; VIÑAS et al., 2018).

HPAs PCBs, OCPs e PBDEs são poluentes ambientais generalizados que causam riscos à saúde de organismos aquáticos e humanos (OKAY et al., 2017; VAEZZADEH et al., 2021; VIÑAS et al., 2018). Estes compostos são de grande interesse devido à baixa hidrossolubilidade e alta lipossolubilidade, alta resistência à degradação fotolítica, química e biológica, risco de acúmulo e toxicidade (OKAY et al., 2017; MILUN et al., 2016).

Benali et al. (2017) utilizaram mexilhões *M. galloprovincialis* coletados na Argélia para avaliar os níveis de concentração e os efeitos tóxicos de produtos químicos persistentes (PCBs e HPAs), metais (Cu, Zn, Pb e Cd) e as respostas bioquímicas, como CAT e GST. O estudo só registrou correlação forte entre as respostas bioquímicas e os níveis de metais no bivalve, mas a correlação foi fraca em relação aos PCBs e HPAs. Resultados semelhantes foram encontrados por Okay et al. (2017), que não verificaram correlação clara entre as atividades enzimáticas e as concentrações de HPAs, PCBs, OCPs nos tecidos de *M. galloprovincialis* amostrados na Turquia. Já no estudo conduzido por Laitano e Fernández-Gimenez (2016) na Argentina, as respostas bioquímicas de *Brachidontes rodriguezii* amostrado em local cronicamente contaminado por PCBs e HPAs foram mais evidentes em comparação a um local livre desse tipo de poluição.

A avaliação da bioacumulação de poluentes orgânicos em mexilhões (*M. galloprovincialis*) transplantados de uma área não poluída para outra poluída na costa da Croácia constatou aumento nas concentrações de PCBs e OCPs de 6,5 e 2 vezes, respectivamente, dois meses após o transplante dos indivíduos (MILUN et al., 2016). Os autores monitoraram as concentrações desses poluentes em mexilhões residentes coletados anualmente entre 2002 a 2011, constatando variações sazonais no tecido mole influenciadas principalmente por parâmetros ambientais. Em outro estudo utilizando *M. galloprovincialis* foi possível diferenciar os níveis de poluição de acordo com as concentrações de HPAs, PBDEs e PCBs bioacumuladas nos bivalves em 11 locais de amostragem da costa atlântica espanhola (VIÑAS et al., 2018). Respostas semelhantes foram encontradas em monitoramento utilizando *P. viridis* para avaliar as concentrações de PCBs, PBDEs e OCPs na costa oeste da Península da Malásia (VAEZZADEH et al., 2021). Esses resultados sugerem que os bivalves são eficientes como biomonitores da disponibilidade de contaminantes orgânicos persistentes no ambiente.

Detecção de componentes farmacêuticos na água

O aumento na produção e utilização mundial de componentes farmacêuticos representou grande benefício a saúde humana, vegetal e animal, mas também foi acompanhado do aumento da concentração desses componentes em ecossistemas naturais (MARTÍNEZ-MORCILLO et al., 2020). O principal motivo de preocupação é que, diferentemente dos poluentes químicos tradicionais, os componentes farmacêuticos são compostos bioativos projetados para serem eficazes em concentrações muito baixas (MEZZELANI et al., 2018). Dessa forma, ao alcançarem os ecossistemas, eles podem afetar as espécies aquáticas ao longo de todo ciclo de vida. A presença dos componentes farmacêuticos no ambiente aquático se dá por descargas urbanas, industriais, agrícolas e de estações de tratamento de águas residuais, e cabe destacar a baixa taxa de degradação de alguns desses componentes em estações de tratamentos de efluentes (ALMEIDA et al., 2020). Os bivalves têm sido utilizados no monitoramento de contaminação por fármacos devido à sua presença em regiões costeiras e ao hábito filtrador, concentrando em seus tecidos diferentes tipos de compostos presentes na coluna de água (ALMEIDA et al., 2020; ŚWIACKA et al., 2019).

Martínez-Morcillo et al. (2020) avaliaram a presença de 27 compostos farmacêuticos ativos pertencentes a grupos terapêuticos comuns (e.g., cardiovascular, antiasmático, psicoativo, diurético, analgésico/anti-inflamatório e antibiótico) em diferentes espécies marinhas coletadas no noroeste da Espanha. Dentre os sete animais estudados, três eram bivalves: mexilhão (*M. galloprovincialis*), navalha de vagem (*Ensis siliqua*) e berbigão (*C. edule*). Os fármacos psicoativos venlafaxina e citalopram foram detectados no berbigão e na navalha de vagem, respectivamente. Nesse último bivalve também foi identificada a presença de ronidazol, um antiparasitário veterinário que consta na lista de substâncias proibidas pela União Europeia desde 1993. Com base na correlação entre os locais de coleta e as respostas dos biomarcadores identificados nos bivalves, nota-se que eles têm potencial para serem biomonitores de compostos farmacêuticos.

Medicamentos de uso humano (carbamazepina utilizada no tratamento da epilepsia e dor neuropática, e lincomicina, que é um antibiótico) e de uso veterinário (antibiótico sulfametoxazol) também foram detectados em tecidos de bivalves que ocorrem em manguezais de Cingapura (BAYEN et al., 2016). Segundo os autores, a bioacumulação desses resíduos farmacêuticos em mexilhões (*P. viridis*) e amêijoas (*Polymesoda expansa*) é um indício de que eles estão biodisponíveis no local.

A concentração de fármacos na água do mar é, na maioria das vezes, muito baixa para ser detectada. Dessa forma, a utilização de bivalves possibilita a detecção de produtos farmacêuticos no ambiente marinho, mesmo quando em concentrações muito baixas (ALMEIDA et al., 2021; ŚWIACKA et al., 2019). A maioria dos estudos sobre as respostas de biomarcadores em bivalves na presença de componentes farmacêuticos carece de avaliação dos efeitos no longo prazo para fornecer informações sobre como os organismos reagem às drogas, conforme indica a revisão de Almeida et al. (2020). Embora estudos em laboratório sejam importantes como modelos preditivos, deve-se levar em consideração que as condições de laboratório podem alterar o comportamento dos processos estudados em comparação ao ambiente natural (ŚWIACKA et al., 2019).

Bionitoramento de microplásticos

A acumulação de resíduos plásticos no ambiente é uma preocupação para a conservação marinha (BEYER et al., 2017). Os microplásticos (MPs: partículas menores que 5 mm) podem ser o resultado da fragmentação de pedaços maiores de plástico, ou são partículas já produzidas nessa dimensão. Os MPs representam mais de 90% dos resíduos plásticos marinhos globais e são poluentes persistentes, podendo durar de centenas a milhares de anos no ambiente (LI et al., 2019; SANTANA et al., 2016). Os bivalves podem ser úteis no biomonitoramento de MPs devido a alimentação filtradora, que os expõe diretamente aos MPs presentes na coluna de água.

Li et al. (2016) investigaram a presença de MPs em mexilhões (*M. edulis*) coletados em 22 locais na China, em amostragem que abrangeu cerca de 20 mil km da costa. A amostragem foi realizada em áreas com intensa atividade antrópica (altamente contaminadas) e áreas mais preservadas. Os autores concluíram que a presença de MPs nos mexilhões está generalizada nas águas costeiras chinesas. Resultados semelhantes foram obtidos utilizando o mexilhão *P. perna* no Brasil. Santana et al. (2016) analisaram a presença de MPs em animais coletados no estuário de Santos, sudeste do Brasil, que abriga o maior porto da América do Sul. O estudo verificou a presença de MPs em 75% dos mexilhões amostrados.

Quanto às possíveis alterações bioquímicas nos bivalves provocadas pela exposição aos MPs, um estudo recente analisou os efeitos do acúmulo e potencial toxicidade de polipropileno (PP) e polietileno (PE) na ostra *C. gigas* (REVEL et al., 2020). Os biomarcadores utilizados foram alterações teciduais e imunológicas, defesa

antioxidante e danos ao DNA. Os MPs foram detectados e quantificados nos tecidos da ostra (glândula digestiva, brânquias e outros tecidos) e biodepósitos (fezes e pseudo-fezes). Nenhuma alteração significativa foi encontrada nos biomarcadores em ostras expostas durante 10 dias a uma mistura de PP e PE, com vários formatos e ampla faixa de tamanho ($<400 \mu\text{m}$). A revisão sobre o tema realizada por Li et al. (2019) ressalta que grande parte dos ensaios sobre MPs em bivalves utiliza níveis de exposição altos, que não representariam as condições no ambiente.

Ainda não há consenso na literatura quanto a viabilidade da utilização de bivalves para o monitoramento de poluição por MPs. No trabalho realizado por Zhao et al. (2018) com mexilhões *M. edulis* foi observado que mais de 40% das partículas de MP foram rejeitadas ou excretadas pelos animais. Cho et al. (2021) afirmaram que bivalves podem ser utilizados para monitorar a poluição por MPs, uma vez que os animais bioacumulam MPs que têm as mesmas características daqueles presentes na água. Isso já seria suficiente para considera-los bons biomonitores. Porém, Cho et al. (2021) também reconheceram que ainda é necessário realizar monitoramentos mais abrangentes, considerando várias matrizes ambientais, de forma que os dados sejam consistentes e comparáveis.

Biomonitoramento de alterações ambientais utilizando a concha de bivalves

A concha do molusco bivalve é um exosqueleto para fixação dos músculos, que protege o animal contra predadores (GOSLING, 2015). A concha é secretada pelo manto e consiste principalmente de cristais de carbonato de cálcio (CaCO_3) incorporados em uma matriz orgânica. Essa matriz orgânica é composta pelo polissacarídeo β -quitina ($\text{C}_8\text{H}_{15}\text{NO}_6$), uma proteína hidrofóbica, e um complexo conjunto de proteínas hidrofílicas ricas em ácido aspártico (GOSLING, 2015). O componente mineral representa mais de 95% do peso da concha, enquanto somente 1% a 5% do peso é representado pela matriz orgânica (GOSLING, 2015; SONG et al., 2019).

A composição química das camadas da concha fornece dados sobre a história da incorporação de um elemento químico ao longo da vida do molusco (MEDAS et al., 2018). A utilização da concha de bivalves no biomonitoramento pode, por exemplo, reduzir a influência dos processos fisiológicos provocados pela exposição a substâncias ao longo da vida do animal, ao mesmo tempo em que o registro de concentrações dos elementos pode ser estendido por décadas ou séculos por meio de conchas de coleções históricas e/ou provenientes de sítios arqueológicos (WILSON et al., 2018).

Nedzarek et al. (2021) analisaram conchas de mexilhões (*Unio tumidus*) atuais e dos séculos X e XI. Os níveis médios de Fe, Cu, Ni, Pb e Cd nas conchas coletadas no século XXI foram significativamente maiores em comparação às conchas dos séculos X e XI. Esses resultados mostraram o potencial da concha dos bivalves na análise temporal da poluição antropogênica por metais. Ao estudar conchas de *M. galloprovincialis* coletadas em uma região atingida pelo tsunami Tohoku no Japão, Murakami-Sugihara et al. (2019) observaram que a razão Mn/Ca nas conchas aumentou imediatamente após o evento. A concentração de Mn diminuiu ao longo de 40 dias após o tsunami, mas em nível mais elevado que o observado antes do evento.

Outro fator que pode ser investigado pela análise da concha é a acidificação oceânica, que é a diminuição do pH oceânico devido à captação de CO₂ antropogênico da atmosfera. Uma vez dissolvido na água do mar, o CO₂ dá origem ao ácido carbônico (H₂CO₃), que se dissocia para formar íons de bicarbonato (HCO₃⁻) que reagem com os íons carbonato (CO₃²⁻) presentes na água. Esse processo diminui a biodisponibilidade de íons carbonato na água do mar (NORRIE et al., 2019). Com a diminuição da concentração de CO₃²⁻ na água, os bivalves podem ter dificuldade para formar e manter suas conchas. Norrie et al. (2018) observaram que as razões Co/Ca, Ni/Ca e Ti/Ca diferem de forma clara e consistente ao longo das camadas da concha do mexilhão *P. canaliculus* formada sob condições mais elevadas de CO₂ (pCO₂ = 400 e 1050 μatm, respectivamente).

Ao estudar a microestrutura da concha aragonítica do berbigão *C. edule* amostrado na Alemanha e na Holanda, Milano et al. (2017) observaram que ela varia com a temperatura. Os prismas de carbonato de cálcio formados no verão foram grandes e alongados, já os formados no inverno foram pequenos e arredondados. O estudo também avaliou a taxa de crescimento e uma série de outras variáveis ambientais, tais como salinidade, disponibilidade de alimentos (níveis de clorofila a) e turbidez da água, verificando que não houve correlação entre elas e mudanças na microestrutura da concha. Assim, foi possível estabelecer um modelo que permite estimar indiretamente a temperatura da água local utilizando conchas de *C. edule*.

CONCLUSÃO

A análise da literatura disponível (2016-2021) sobre o potencial de bivalves como biomonitores de condições ambientais revelou que a viabilidade de utilização dos animais para essa finalidade depende dos fatores a serem monitorados e da espécie selecionada.

Por exemplo, há divergência na literatura quanto a eficiência da utilização de bivalves em diagnósticos de poluição ambiental por metais e semimetais. Há espécies em que a bioacumulação no tecido tem forte correlação com os elementos disponíveis no ambiente, mas isso não é uma regra. O mesmo acontece com relação às respostas bioquímicas dos parâmetros antioxidantes e oxidativos, pois algumas espécies são mais tolerantes à contaminação. Por outro lado, a utilização de bivalves para monitorar a presença de contaminantes orgânicos persistentes e componentes farmacêuticos se mostra uma opção adequada. Os bivalves podem acumular tais contaminantes em concentrações mais elevadas do que as presentes na água, o que facilita sua detecção e monitoramento. Quanto ao monitoramento de poluição por MPs, a utilização de bivalves ainda é controversa. Embora eles possam acumular MPs devido a sua alimentação filtradora, a ingestão desse tipo de poluente depende do tamanho e do formato das partículas ingeridas. Dessa forma, a viabilidade dos bivalves como biomonitores de MPs dependerá do objetivo do estudo: eles são úteis para determinar as características dos MPs presentes no ambiente, mas são menos indicados para estimar as concentrações relativas de MPs no ambiente. Esta revisão de literatura verificou, ainda, que a utilização dos bivalves como organismos-sentinela fornece informações sobre alterações dos parâmetros da água, tais como alcalinidade e temperatura.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho recebeu fomento do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (processo 302.598/2021-9), Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro - FAPERJ (processos E-26/200/797/2021 e E-26/210.498/2019), e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Â.; SOARES, A. M.; ESTEVES, V. I.; FREITAS, R. Occurrence of the antiepileptic carbamazepine in water and bivalves from marine environments: A review. **Environmental Toxicology and Pharmacology**, v. 86, 2021.
- ALMEIDA, Â.; SOLÉ, M.; SOARES, A. A. M.; FREITAS, R. Anti-inflammatory drugs in the marine environment: Bioconcentration, metabolism and sub-lethal effects in marine bivalves. **Environmental Pollution**, v. 263, p. 114442, 2020.
- ANEZAKI, K.; NAKANO, T.; KASHIWAGI, N. Estimation of Polychlorinated Biphenyl Sources in Industrial Port Sediments Using a Bayesian Semifactor Model

Considering Unidentified Sources. **Environmental Science & Technology**, v. 50, n. 2, p. 765–771, 2016.

BARBOZA, H. T. G.; P. R. DO NASCIMENTO, X.; F. SILVA, O.; G. SOARES, A.; B. N. DACOSTA, J. Compostos Organofosforados e seu Papel na Agricultura. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 1, p. 172–193, 2018.

BAYEN, S.; ESTRADA, E. S.; JUHEL, G.; KIT, L. W.; KELLY, B. C. Pharmaceutically active compounds and endocrine disrupting chemicals in water, sediments and mollusks in mangrove ecosystems from Singapore. **Marine Pollution Bulletin**, v. 109, n. 2, p. 716–722, 2016.

BENALI, I.; BOUTIBA, Z.; GRANDJEAN, D.; ALENCASTRO, L. F. de; ROUANE-HACENE, O.; CHÈVRE, N. Spatial distribution and biological effects of trace metals (Cu, Zn, Pb, Cd) and organic micropollutants (PCBs, PAHs) in mussels *Mytilus galloprovincialis* along the Algerian west coast. **Marine Pollution Bulletin**, v. 115, n. 1-2, p. 539–550, 2017.

BEYER, J.; GREEN, N. W.; BROOKS, S.; ALLAN, I. J.; RUUS, A.; GOMES, T.; BRÅTE, I. L. N.; SCHØYEN, M. Blue mussels (*Mytilus edulis* spp.) as sentinel organisms in coastal pollution monitoring: A review. **Marine Environmental Research**, v. 130, p. 338–365, 2017.

CHO, Y.; SHIM, W. J.; JANG, M.; HAN, G. M.; HONG, S. H. Nationwide monitoring of microplastics in bivalves from the coastal environment of Korea. **Environmental Pollution**, v. 270, p. 116175, 2021.

GOLDBERG, E. D. The mussel watch — A first step in global marine monitoring. **Marine Pollution Bulletin**, v. 6, p. 111-114, 1975.

GOSLING, E. **Marine Bivalve Molluscs**. USA: Wiley-Blackwell, 2015.

HARIHARAN, G.; PURVAJA, R.; ROBIN, R. S.; RAMESH, R. Evaluation of the multiple biomarkers on identification of the vulnerable coastal pollution hotspots. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 22, p. 23281–23290, 2016.

HOOK, S. E.; GALLAGHER, E. P.; BATLEY, G. E. The role of biomarkers in the assessment of aquatic ecosystem health. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 10, n. 3, p. 327–341, 2014.

LAITANO, M. V.; FERNÁNDEZ-GIMENEZ, A. V. Are Mussels Always the Best Bioindicators? Comparative Study on Biochemical Responses of Three Marine Invertebrate Species to Chronic Port Pollution. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 97, n. 1, p. 50–55, 2016.

LI, J.; LUSHER, A. A. L.; ROTCHELL, J. J. M.; DEUDERO, S.; TURRA, A.; BRÅTE, I. L. N. I.; SUN, C.; HOSSAIN, M. S.; LI, Q.; KOLANDHASAMY, P.; KOLANDHASAMY, P.; SHI, H. Using mussel as a global bioindicator of coastal microplastic pollution. **Environmental Pollution**, v. 244, p. 522–533, 2019.

LI, J.; QU, X.; SU, L.; ZHANG, W.; YANG, D.; KOLANDHASAMY, P.; LI, D.; SHI, H. Microplastics in mussels along the coastal waters of China. **Environmental Pollution**, Elsevier Ltd, v. 214, p. 177–184, 2016.

MARQUES, A.; PILÓ, D.; ARAÚJO, O.; PEREIRA, F.; GUILHERME, S.; CARVALHO, S.; SANTOS, M. A.; PACHECO, M.; PEREIRA, P. Propensity to metal accumulation and oxidative stress responses of two benthic species (*Cerastoderma edule* and *Nephtys hombergii*): are tolerance processes limiting their responsiveness? **Ecotoxicology**, v. 25, n. 4, p. 664–676, 2016.

MARTÍNEZ-MORCILLO, S.; RODRÍGUEZ-GIL, J. L.; FERNÁNDEZ-RUBIO, J.; RODRÍGUEZ-MOZAZ, S.; MÍGUEZ-SANTIYÁN, M. P.; VALDES, M. E.; BARCELÓ, D.; VALCÁRCEL, Y. Presence of pharmaceutical compounds, levels of biochemical biomarkers in seafood tissues and risk assessment for human health: Results from a case study in North-Western Spain. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 223, n. 1, p. 10–21, 2020.

MEDAS, D.; CARLOMAGNO, I.; MENEGHINI, C.; AQUILANTI, G.; ARAKI, T.; BEDOLLA, D. E.; BUOSI, C.; CASU, M. A.; GIANONCELLI, A.; KUNCSEK, A. C.; MARALOIU, V. A.; GIUDICI, G. D. Zinc incorporation in marine bivalve shells grown in mine-polluted seabed sediments: a case study in the malfidano mining area (SW Sardinia, Italy). **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 36, p. 36645–36660, 2018.

MEZZELANI, M.; GORBI, S.; REGOLI, F. Pharmaceuticals in the aquatic environments: Evidence of emerged threat and future challenges for marine organisms. **Marine Environmental Research**, v. 140, p. 41–60, 2018.

MILANO, S.; SCHÖNE, B. R.; WITBAARD, R. Changes of shell microstructural characteristics of *cerastoderma edule* (bivalvia) — a novel proxy for water temperature. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 465, p. 395–406, 2017.

MILUN, V.; GRGAS, D.; DRAGIČEVIĆ, T. L. Assessment of PCB and chlorinated pesticide accumulation in mussels at Kaštela Bay (Eastern Adriatic). **Science of The Total Environment**, v. 562, p. 115–127, 2016.

MURAKAMI-SUGIHARA, N.; SHIRAI, K.; HORI, M.; AMANO, Y.; FUKUDA, H.; OBATA, H.; TANAKA, K.; MIZUKAWA, K.; SANO, Y.; TAKADA, H.; OGAWA, H. Mussel Shell Geochemical Analyses Reflect Coastal Environmental Changes Following the 2011 Tohoku Tsunami. **ACS Earth and Space Chemistry**, v. 3, n. 7, p. 1346–1352, 2019.

NEDZAREK, A.; CZERNIEJEWSKI, P.; TÓRZ, A. A comparison of the concentrations of heavy metals in modern and medieval shells of swollen river mussels (*Unio tumidus*) from the Szczecin Lagoon, SW Baltic basin. **Marine Pollution Bulletin**, v. 163, p. 111959, 2021.

NORRIE, C. R.; DUNPHY, B. J.; RAGG, N. L. C.; LUNDQUIST, C. J. Ocean acidification can interact with ontogeny to determine the trace element composition of bivalve shell. **Limnology and Oceanography Letters**, v. 3, n. 5, p. 393–400, 2018.

NORRIE, C. R.; DUNPHY, B. J.; RAGG, N. L.; LUNDQUIST, C. J. Comparative influence of genetics, ontogeny and the environment on elemental fingerprints in the shell of *Perna canaliculus*. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–11, 2019.

OKAY, O. S.; KARACIK, B.; GÜNGÖRDÜ, A.; YILMAZ, A.; KOYUNBABA, N. C.; YAKAN, S. D.; HENKELMANN, B.; SCHRAMM, K. W.; OZMEN, M. Monitoring of

organic pollutants in marine environment by semipermeable membrane devices and mussels: accumulation and biochemical responses. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 23, p. 19114–19125, 2017.

OLIVEIRA, A. G. L. de; ROCHA, R. C. C.; SAINT'PIERRE, T. D.; HAUSER-DAVIS, R. A.; MELLO-SILVA, C. C.; SANTOS, C. P. Elemental Contamination in Brown Mussels (*Perna Perna*) Marketed in Southeastern Brazil. **Biological Trace Element Research**, fev 2021. ISSN 15590720. DOI 10.1007/s12011-021-02644-y.

OLIVEIRA, A. H.; CAVALCANTE, R. M.; DUAVÍ, W. C.; FERNANDES, G. M.; NASCIMENTO, R. F.; QUEIROZ, M. E.; MENDONÇA, K. V. The legacy of organochlorine pesticide usage in a tropical semi-arid region (Jaguaribe River, Ceará, Brazil): Implications of the influence of sediment parameters on occurrence, distribution and fate. **Science of The Total Environment**, v. 542, p. 254–263, jan 2016. ISSN 00489697. DOI 10.1016/j.scitotenv.2015.10.058.

REVEL, M.; CHÂTEL, A.; PERREIN-ETTAJANI, H.; BRUNEAU, M.; AKCHA, F.; SUSSARELLU, R.; ROUXEL, J.; COSTIL, K.; DECOTTIGNIES, P.; COGNIE, B.; LAGARDE, F.; MOUNEYRAC, C. Realistic environmental exposure to microplastics does not induce biological effects in the Pacific oyster *Crassostrea gigas*. **Marine Pollution Bulletin**, Elsevier, v. 150, p. 110627, 2020.

ROVETA, C.; ANNIBALDI, A.; AFGHAN, A.; CALCINAI, B.; Di Camillo, C. G. C. C. G.; GREGORIN, C.; ILLUMINATI, S.; MANTAS, T. P. T.; TRUZZI, C.; PUCE, S. Biomonitoring of heavy metals: The unexplored role of marine sessile taxa. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, n. 2, p. 1–16, 2021.

SANTANA, M. F.; ASCER, L. G.; CUSTÓDIO, M. R.; MOREIRA, F. T.; TURRA, A. Microplastic contamination in natural mussel beds from a Brazilian urbanized coastal region: Rapid evaluation through bioassessment. **Marine Pollution Bulletin**, v. 106, n. 1-2, p. 183–189, 2016.

SONG, X.; LIU, Z.; WANG, L.; SONG, L. Recent advances of shell matrix proteins and cellular orchestration in marine molluscan shell biomineralization. **Frontiers in Marine Science**, v. 6, 2019.

STREHSE, J. S.; MASER, E. Marine bivalves as bioindicators for environmental pollutants with focus on dumped munitions in the sea: A review. **Marine Environmental Research**, v. 158, p. 105006, 2020.

ŚWIACKA, K.; MACULEWICZ, J.; SMOLARZ, K.; SZANIAWSKA, A.; CABAN, M. Mytilidae as model organisms in the marine ecotoxicology of pharmaceuticals - A review. **Environmental Pollution**, v. 254, p. 113082, 2019.

VAEZZADEH, V.; THOMES, M. W.; KUNISUE, T.; TUE, N. M.; ZHANG, G.; ZAKARIA, M. P.; AFFENDI, Y. A.; YAP, F. C.; CHEW, L. L.; TEOH, H. W.; LEE, C. W.; BONG, C. W. Examination of barnacles' potential to be used as bioindicators of persistent organic pollutants in coastal ecosystem: A Malaysia case study. **Chemosphere**, v. 263, p. 128272, 2021.

VIÑAS, L.; PÉREZ-FERNÁNDEZ, B.; SORIANO, J. A.; LÓPEZ, M.; BARGIELA, J.; ALVES, I. Limpet (*Patella* sp) as a biomonitor for organic pollutants. A proxy for mussel? **Marine Pollution Bulletin**, v. 133, p. 271–280, 2018.

WILSON, W. A.; FRITTS, A. K.; FRITTS, M. W.; UNRINE, J. M.; CASPER, A. F. Freshwater mussel (Unionidae) shells document the decline of trace element pollution in the regional watersheds of Chicago (Illinois, USA). **Hydrobiologia**, v. 816, n. 1, p. 179–196, 2018.

ZHAO, S.; WARD, J. E.; DANLEY, M.; MINCER, T. J. Field-Based Evidence for Microplastic in Marine Aggregates and Mussels: Implications for Trophic Transfer. **Environmental Science & Technology**, v. 52, n. 19, p. 11038–11048, 2018.

Recebido em: 28/02/2022

Aprovado em: 25/03/2022

Publicado em: 30/03/2022