

**A INVASÃO DO MEXILHÃO DOURADO NAS UHE'S
BRASILEIRAS: UM DESAFIO PARA A MODELAGEM
MATEMÁTICA**

***THE INVASION OF GOLDEN MUSSELS IN BRAZILIAN
HPPS: A CHALLENGE FOR MATHEMATICAL MODELING***

Claudia Mazza Dias 

RESUMO

O mexilhão dourado é um molusco que se apresenta como um importante invasor biológico no Brasil, ameaçando o funcionamento de usinas hidroelétricas (UHE's) por se acumular nas estruturas e causar impactos biológicos significativos no ambiente. Este trabalho relata os esforços que vêm sendo feitos através de pesquisas interdisciplinares na tentativa de controle da infestação e discute como as espécies invasoras são um risco e um grande desafio para a modelagem matemática. Assim, o trabalho traz aspectos da chamada Ecologia Matemática, através de um caso de grande importância para o Brasil, e serve de alerta sobre a presença de invasores, cada vez mais frequente, e ilustra como a Matemática pode auxiliar o planejamento de ações de controle e nortear as políticas de mitigação.

Palavras-chave: Mexilhão dourado, Modelagem matemática, Invasão Biológica.

ABSTRACT

The golden mussel is a mollusk that presents itself as an important biological invader in Brazil, threatening the operation of hydroelectric plants (UHEs) by accumulating in structures and causing significant biological impacts on the environment. This work reports on the efforts that have been made through interdisciplinary research in an attempt to control the infestation and discusses how invasive species are a risk and a major challenge for mathematical modeling. Thus, the work brings aspects of the so-called Mathematical Ecology, through a case of great importance for Brazil, and serves as a warning about the presence of invaders, which is increasingly frequent, and illustrates how Mathematics can help in planning conservation actions. control and guide mitigation policies.

Keywords: *Golden mussel, Mathematical modeling, Biological invasion.*

Introdução

As chamadas Espécies exóticas são aquelas que ocorrem fora de sua área de distribuição natural, e segundo Lockwood *et al.* (2007), como resultado da dispersão intencional ou acidental facilitada por atividades humanas. Quando uma espécie exótica se torna dominante e amplamente distribuída em um novo ambiente, passa a ser chamada de invasora. As invasões biológicas representam grande ameaça ao equilíbrio de um ecossistema. Quando um indivíduo estranho a um ambiente é introduzido, é frequente a ausência de predadores na região. Tal é o caso dos bioinvasores aquáticos, que são muitas vezes trazidos ao Brasil através da água de lastro de navios. Com o crescimento do transporte de cargas, tem-se o agravamento do problema. Um exemplo é o coral-sol, nome popular dos corais de gênero *Tubastraea* spp., originários do Oceano Pacífico, e presentes no Brasil desde a década de 80, espalhando-se rapidamente pelo litoral brasileiro, causando sérios impactos ecológicos, econômicos e sociais (Oigman-Pszczol *et al.*, 2019). Outro exemplo, um pouco mais recente, é o Peixe-leão, nome popular do *Pterois volitans*, um peixe venenoso, marinho, tropical, de recifes de corais do Oceano Pacífico indiano e ocidental, primeiro peixe dessa região a se estabelecer em águas do Atlântico, com primeiro registro da espécie, no Brasil em 2014, em Arraial do Cabo (RJ) (Brasil, 2015). Existem trabalhos que indicam que sua introdução em águas brasileiras teria ocorrido devido a sua comercialização para aquarofilia, e posterior desistência de criadores que teriam realizado a soltura da espécie no mar. Porém, pode ter ocorrido também o transporte de ovos e larvas por águas de lastro de navios (Brasil, 2015). Frente a um cenário desafiador e que muitas vezes favorece a bioinvasão, destaca-se ainda o molusco exótico *Limnoperna fortunei*, conhecido como mexilhão dourado, alvo do presente trabalho. A presença do mexilhão dourado nas UHE's acarreta enormes prejuízos, uma vez que ele se fixa nos equipamentos exigindo paradas frequentes para manutenção e limpeza. Existem diversas pesquisas que modelam a dinâmica populacional dessa espécie. Alguns estudos evidenciam a relação entre as populações de algas e mexilhões (Van de Koppel *et al.*, 2015), bem como modificações deste modelo têm sido estudadas, como em ZHOU *et al.* (2021). O objetivo deste trabalho é discutir resultados recentes acerca da modelagem matemática da

infestação por mexilhões dourados nas UHE's, traçando as dificuldades enfrentadas e as perspectivas futuras.

O presente texto é organizado do seguinte modo: primeiramente apresenta-se a espécie de interesse, o mexilhão dourado. Em seguida, descreve-se uma série de iniciativas para seu controle em UHE's brasileiras, destacando-se os principais desafios enfrentados na modelagem matemática. Finalmente, é feita uma reflexão a respeito dos novos desafios e dos aspectos socioeconômicos que se apresentam a medida que se avança nessas pesquisas.

Metodologia

O mexilhão dourado é um molusco bivalve (concha composta por duas valvas), de água doce. Sabe-se que tem origem no sudeste asiático, possui notável preferência por ambientes antrópicos (i.e., alterados pelo homem) e tem rápida proliferação (Boltovskoy *et al.*, 2006). Essa última característica o torna uma ameaça já que o transporte aquático favorece seu espalhamento através da bioincrustação e da água de lastro. Seu primeiro registro no Brasil data de 2002, em São Paulo após percorrer o Rio de La Plata, o Rio Paraná e o Rio Uruguai (Boltovskoy *et al.*, 2006). Seus danos ao funcionamento de UHE's são uma das maiores preocupações da atualidade. A correnteza da água facilita o acesso interno das larvas do mexilhão às plantas hidroelétricas e, em um ambiente de fornecimento contínuo de alimento e oxigênio, o mexilhão dourado atinge a fase adulta aderindo-se às tubulações. Assim, o fluxo de água diminui, exigindo a limpeza frequente dos equipamentos, resultando em mais gastos e em menor eficiência para a usina. Assim, seguem as contribuições mais recentes da matemática aplicada para o controle da espécie.

Na tentativa de contribuir com o controle da espécie, em 2019, foi apresentado o Projeto de P & D “Controle da Infestação do Mexilhão Dourado por Indução Genética de Fertilidade”, fruto de uma parceria entre as empresas CTG Brasil, SPIC Brasil e Tijoá, com recursos do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL. O projeto tem as empresas Hubz e Bio Bureau como executoras e a participação de 3 Universidades, no desenvolvimento de

modelos matemáticos: a Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), o Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio de Janeiro (CEFET-RJ) e a Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

A primeira etapa da pesquisa tinha como objetivo observar os dados obtidos pela equipe de biólogos da Hubz, que realizaram a Análise in situ, constituída pela inspeção visual, coleta de amostras, contabilização dos mexilhões em laboratório, análise de imagens de satélite com relação à clorofila e à densidade de algas e temperatura, e suas possíveis correlações com o crescimento dos mexilhões. Com base em tais dados, referentes à UHE Três Irmãos em São Paulo, a equipe de pesquisadores, propôs um modelo matemático inédito para descrever as iterações entre as populações de mexilhões adultos, larvas e algas (sua principal fonte de alimento). O objetivo deste estudo foi estabelecer um método eficaz e eficiente para quantificação da população do mexilhão dourado em reservatórios de hidrelétricas, visando o controle populacional do animal. Um modelo matemático bidimensional foi desenvolvido combinando hidrodinâmica e dinâmica populacional para simular a distribuição de mexilhões em um reservatório. Os resultados mostraram que a região da barragem de Três Irmãos foi progressivamente infestada por mexilhões, e depois de 18 meses de simulação alcançou 80% da sua capacidade suporte. O método se mostrou satisfatório e o mapa de localização dos agrupamentos de mexilhões corresponde a observações in situ. Além disso, o resultado da simulação da densidade das algas correspondeu ao mapa de densidade de clorofila obtido por imagens de satélite. A metodologia desenvolvida pode ser aplicada a novas áreas e pode ser expandida para prever variações populacionais, servindo para guiar medidas de preservação ambiental e de recuperação de reservatórios impactados, apresentando uma ferramenta alternativa para os operadores hidrelétricos, que podem utilizar as informações junto as inspeções locais no planejamento dos intervalos de manutenção antes que a infestação danifique os equipamentos. Os principais resultados foram publicados em Silva *et al.* (2022). Essa iniciativa, interdisciplinar, é prova de que ecologia e matemática podem trabalhar juntas para o desenvolvimento do país.

Com o sucesso das pesquisas, uma nova proposta se apresentou, a de simular outros reservatórios da região. Assim, foi analisada a dinâmica de

crescimento dos mexilhões dourados no reservatório de Jupuí localizada no rio Paraná, na divisa dos Estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul. Os resultados evidenciaram o processo de infestação a partir da saída do Rio Tietê e avançando gradativamente pela região, atingindo áreas que merecem atenção. Os resultados dessa fase foram publicados em Barbosa *et al.* (2022). Outros dois reservatórios permanecem em estudo: a UHE Ilha Solteira e a UHE São Simão.

Um desafio que logo se manifestou na obtenção dos resultados é a necessidade de aprimoramento dos parâmetros físicos utilizados. Muitos desses parâmetros foram estimados a partir da literatura especializada, que na maioria das vezes se referem a outros moluscos, como o mexilhão zebra, por exemplo. Promover novas visitas de campo passou a ser essencial para obter dados atualizados e suprir as lacunas identificadas. Enquanto novos dados de campo são obtidos, dedicou-se ao estudo analítico do modelo desenvolvido. Um amplo estudo que inclui a determinação dos pontos críticos e os estados estacionários, buscando a estabilidade das condições de regime estacionário, através da taxa básica de reprodução foi realizado. Além disso, foi feita a análise de sensibilidade dos parâmetros envolvidos. Os resultados são relevantes porque permitem a interpretação matemática do potencial de infestação do mexilhão dourado através da taxa básica de reprodução. Além disso, a análise de sensibilidade sugere quão importantes são os parâmetros para esse potencial. Nesse sentido, este trabalho fornece informações básicas para orientar futuras estratégias de controle, pois inclui a quantificação das espécies envolvidas ao longo do tempo, bem como uma condição para infestação (Barbosa *et al.*, 2023).

A ideia de se controlar a infestação através da indução genética de infertilidade se apresenta como uma alternativa de controle populacional promissora: a inserção de uma espécie geneticamente modificada com o objetivo de, em contato com o molusco selvagem, produzir gerações inférteis. A proposta foi matematicamente testada na dissertação de Mestrado de Barbosa (2022) do PPGMMC-UFRRJ que apresentou um modelo matemático que contempla tal competição. Uma contribuição importante, uma vez que poderá fornecer informações para nortear futuros experimentos. Contudo, o estudo apresentou dois pontos conclusivos importantes: que através da competição planejada a erradicação pode ser atingida e que há necessidade de vantagens

competitivas para que a estratégia funcione. Indicando que a eficiência reprodutiva e um mexilhão modificado menos suscetível à predação são as vantagens mais promissoras. O desenvolvimento in vitro de um mexilhão geneticamente modificado ainda está em progresso, e os resultados da pesquisa podem contribuir nesse planejamento.

Do ponto de vista numérico, as simulações necessitam de um esforço computacional considerável. Foram explorados esquemas numéricos eficientes como o operator splitting technique (Azevedo *et al.*, 2022), que consiste em duas etapas. Na primeira etapa, é utilizado o método não linear de elementos finitos estabilizados SUPG - Stream line Upwind Petrov-Galerkin combinado com o método CAU - Consistent Approximate Upwind (Carmo e Alvarez, 2003) e ainda a BDF2, uma fórmula de diferenças regressivas de segunda ordem em duas etapas (Curtiss e Hirschfelder, 1952), empregada nas discretizações espaciais e temporais. O processo não linear é resolvido por uma iteração de ponto fixo de Picard (Burden e Faires, 2011). Na segunda etapa, o modelo é aproximado pelo esquema de Runge-Kutta de quarta ordem (Burden e Faires, 2011). A estratégia foi utilizada para estudar a infestação no Canal Pereira Barreto (SP) e publicada em Azevedo *et al.* (2022). Os resultados indicam que o aumento da densidade de mexilhões observado, apoia a hipótese de que o canal Pereira Barreto serve de berçário para a espécie. Além disso, o canal pode servir de passagem para a infestação de mexilhões no Rio Tietê, que alimenta o reservatório da UHE Três Irmãos, e no Rio São José dos Dourados, que alimenta o reservatório da UHE Ilha Solteira. A técnica de divisão de operadores mostrou-se muito eficiente no controle das oscilações numéricas geradas pela complexidade do problema. No futuro, planeja-se executar simulações a longo prazo usando malhas mais refinadas e um domínio espacial ainda maior, para permitir comparações mais precisas entre as soluções numéricas e dados in situ, já que os experimentos in silico sugerem que o esquema de divisão em dois estágios pode reduzir significativamente o tempo computacional. A metodologia foi premiada como Best Paper Award durante a 22th International Conference on Computational Science and Applications (ICCSA, 2022) em Málaga (Espanha).

Outra contribuição é o aplicativo para monitoramento da população de mexilhões dourados Golden Mussel App, desenvolvido com o pacote Shiny da

linguagem de programação R[©], que tem como objetivo possibilitar que profissionais engajados na redução de danos do setor de geração de energia, possam acompanhar a previsão ao longo do tempo para a densidade das populações de mexilhões adultos, larvas e algas, mesmo sem conhecimentos avançados sobre a modelagem matemática do problema. Desta forma, o aplicativo se configura como ferramenta auxiliar no planejamento de ações de controle do mexilhão dourado e está disponível gratuitamente em <https://goldenmussel.shinyapps.io/GoldenMusselBeta/>. O aplicativo foi tema do Trabalho de Conclusão de Curso de Ricardo Rosas no curso de Matemática Aplicada e Computacional do Instituto Multidisciplinar da UFRRJ (Rosas *et al.*, 2022).

Discussão e Resultados

O que aprendemos com a modelagem matemática da infestação do mexilhão dourado envolve três aspectos principais: (i) a modelagem sempre continua; (ii) enfrentar problemas reais requer uma abordagem interdisciplinar; (iii) é preciso conscientizar a população a respeito do fenômeno. Assim, novos desafios se apresentam como a melhoria das análises *in silico* do problema tridimensional de modo a estudar regiões de interesse como o Canal Pereira Barreto, que se encontra infestado, e estudar a formação de padrões de crescimento do mexilhão comparando os resultados da simulação com os dispositivos bentônicos que foram instalados no reservatório de Jupia. Outra análise importante é o estudo da presença das fazendas de aquicultura, principalmente de tilápias, nessa região, e sua influência na propagação dos mexilhões. Trata-se portanto de se estabelecer condutas para a produção sustentável sem agredir o meio-ambiente e sem contribuir com os danos já presentes pela infestação do mexilhão dourado. O desafio para a ecologia matemática passa não só pela melhoria de seus dados e de seus resultados (matemáticos e numéricos), mas também do diálogo interdisciplinar que possibilita a qualidade das análises. Além disso, cada resultado está fortemente ligado às questões da legislação e às práticas em andamento em cada região. Desse modo conscientizar população e tomadores de decisão a respeito dos potenciais riscos, da presença do mexilhão é de suma importância. Estabelecer

diretrizes para a instalação de novas fazendas de tilápias, atualizando a legislação vigente, evitará danos irreversíveis no futuro. A população também precisa estar ciente desses riscos.

Conclusão

Nem sempre se tem ideia do papel da ciência, em particular da Matemática, no estudo e planejamento de ações que envolvem a Ecologia. O relato apresentado, mostra que vale a pena investir recursos em estudos matemáticos com grande potencial de contribuir para o controle biológico de uma espécie invasora.

REFERÊNCIAS

AZEVEDO, R. Z. S., *et al.* Numerical solution of a 3D system of transient and nonlinear PDEs arising from larvae-algae-mussels interactions. *In.*: Lec. Notes in Comp. Sc., v. 13377, p. 684–697. Springer, Heidelberg, 2022.

BARBOSA, C. H. X. B., *et al.* Analysis of a mathematical model for golden mussels infestation. *Ecological Modelling.* v. 486, n. 110502, p. 1-10, 2023.

BARBOSA, C. H. X. B., *et al.* Modelagem matemática para a infestação de mexilhões dourados no reservatório da hidroelétrica de Jupia-SP. *Pesquisa, Ensino, Ciências Exatas e da Natureza,* n. 6, v. 1, p. 1–9. 2022.

BARBOSA, C. H. X. B. Um estudo hipotético baseado em modelos de crescimento e competição para a dinâmica populacional do mexilhão dourado. Orientadora: Claudia Mazza Dias. 2022. 133 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional), UFRRJ, Seropédica, 2022.

BRASIL. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Plano Emergencial de Monitoramento e Erradicação do Peixe-leão (*Pterois volitans*) na Resex Marinha do Arraial do Cabo (RJ), 2015.

BURDEN, R. L.; FAIRES, J. D. *Numerical Analysis.* Brooks/Cole, Cengage Learning, 2011.

CARMO, E. G. D., ALVAREZ, G. B. A new stabilized finite element formulation for scalar convection-diffusion problems: the streamline and approximate upwind/Petrov-Galerkin method. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* v. 192, n. 31–32, p. 3379–3396, 2003.

CURTISS, C. F., HIRSCHFELDER, J. O. Integration of stiff equations. *Proc. Natl. Acad. Sci.* v. 38, n. 3, p. 235–243, 1952.

LOCKWOOD, J. L.; HOOPES, M. F; MARCHETTI, M. P. *Invasion Ecology*. Primeira Edição. Massachusetts, EUA. Blackwell Publishing, 2007.

OIGMAN-PSZCZOL, S. *et al.* O controle da invasão do coral-sol no Brasil não é uma causa perdida. *Ciência e Cultura*, v. 69, n. 1, p. 56-59, 2017.

ROSAS R. V. G., *et al.* *Semina: Ciênc. Ex. Tech.*, v. 43, n. 2, p. 171-178, 2022.

SILVA, J. C. R., *et al.* Population growth of the golden mussel (*L. fortunei*) in hydroelectric power plants: a study via mathematical and computational modeling. *Brazilian Journal of Water Resources*, v. 27, e.3, 2022.

VAN DE KOPPEL, J., *et al.* Scale-dependent feedback and regular spatial patterns in young mussel beds, *The American Naturalist*. v. 165, n.3, p. E66–E77, 2015.

ZHOU, D., *et al.* Long-time behaviors of two stochastic mussel algae models. *Mathematical Biosciences and Engineering*. v. 18, n. 6, p. 8392-8414, 2021.

Submissão em: 25 jan. 2024

Aceite em: 08 abr. 2024

ⁱ Claudia Mazza Dias, PPGMMC-UFRRJ, E-mail: mazza@ufrj.br.