

Universidade Federal de Ouro Preto Programa de Pós-Graduação em Ciências Física de Materiais

# Dissertação

# Ondas Ultrassônicas para o Controle de Limnoperna Fortunei – o Mexilhão Dourado

**GISLAINE SOARES ARAUJO** 



Ouro Preto 2022

# GISLAINE SOARES ARAUJO

# Ondas Ultrassônicas para o Controle de *Limnoperna*Fortunei – O Mexilhão-Dourado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física de Materiais — FIMAT da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestra em Ciências

Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis (UFOP)

Coorientador: Prof. Dr. Afonso Pelli (UFTM)

**OURO PRETO - MG** 

# SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A663o Araujo, Gislaine Soares.

Ondas Ultrassônicas para o Controle de Limnoperna Fortunei - o Mexilhão Dourado. [manuscrito] / Gislaine Soares Araujo. - 2022. 51 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Assis. Coorientador: Prof. Dr. Afonso Pelli.

Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Física. Programa de Pós-Graduação em Ciencias. Área de Concentração: Física de Materiais.

1. Moluscos bivalves. 2. Incrustação. 3. Ondas ultrassônicas. I. Assis, Paulo. II. Pelli, Afonso. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 501:620



# MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO REITORIA INSTITUTO DE CIENCIAS EXATAS E BIOLOGICAS PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM CIENCIAS/FISICA DE MATERIAIS



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

#### Gislaine Soares Araújo

Ondas ultrassônicas para o controle de Limnoperna fortunei - o Mexilhão Dourado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do titulo de Mestre em Ciências

Aprovada em 21 de dezembro de 2022.

# Membros da banca

Dr. Paulo Santos Assis - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Hermano Endlich Schneider Velten - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Carmino Hayashi - (UFSul de Minas)

Paulo Santos Assis, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 23/01/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Mariana Cristina Moreira Souza**, **ASSISTENTE EM ADMINISTRACAO**, em 23/01/2023, às 12:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do <u>Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015</u>.



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Santos Assis, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/01/2023, às 19:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do <u>Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015</u>.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <a href="http://sei.ufop.br/sei/controlador externo.php?">http://sei.ufop.br/sei/controlador externo.php?</a>
<a href="mailto:acao=documento">acao=documento conferir&id orgao acesso externo=0</a>, informando o código verificador **0460273** e o código CRC **0EAF8895**.

#### **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado a oportunidade de chegar a este momento tão importante em minha carreira profissional e como pessoa.

Agradeço aos meus pais, aos meus irmãos, aos meus tios, aos meus primos, e principalmente ao meu esposo Edjalma e meus filhos Bremer e Braian, além de outros membros da minha família que sempre estiveram ao meu lado, me dando forças e a confiança necessária para atingir meus objetivos.

Agradeço à minha amiga, Ana Cristina, por toda caminhada, assim como a todos os meus colegas de curso.

Agradeço imensamente à Universidade Federal de Ouro Preto, por essa grandiosa oportunidade oferecida a mim. Agradeço também à Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM) por toda estrutura disponibilizada, bem como o apoio técnico.

Agradeço aos meus orientadores, Prof. Dr. Paulo Santos Assis e Prof. Dr. Afonso Pelli, por toda orientação, apoio, paciência e assertividade ao procurar estar comigo e nortear esta pesquisa. Agradeço ainda ao meu primeiro coorientador, Prof. Dr. Adriano Correa.

Agradeço à Mariana, secretária do FIMAT, por toda orientação, apoio e carinho nessa trajetória.

Agradeço à Fundação Gorceix por ter nos apoiados durante toda a pesquisa.

Agradeço à Cemig/ANEEL, projeto GT-0604 pelo apoio e incentivo a pesquisa.

Agradeçoo imensamente aos meus amigos Gabriel e Angélica, por serem ótimos amigos, caminhando ao meu lado nessa dissertação.

À Universidade Federal de Ouro Preto, CAPES, PROPPI, e CNPq, pela oportunidade e apoio financeiro.

Agradeço por tudo que a vida tem me proporcionado, permitindo que eu chegasse tão longe, percorrendo caminhos tão graciosos, com pessoas tão maravilhosas.

Agradeço também a todas as pessoas que, de forma direta ou indireta, contribuíram para o meu trabalho.

Por fim, minha sincera gratidão a todos os que fizeram este momento acontecer!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

O presente estudo se caracteriza como uma pesquisa experimental realizada em laboratório, com

o objetivo de verificar possível efeito de ondas ultrassônicas no controle da invasão do Limnoperna

fortunei (mexilhão-dourado). Foram realizados três experimentos contendo quantidades distintas

de indivíduos e, para cada experimento, o aparelho sonicador foi utilizado na frequência de 40kHz.

Adicionalmente, os procedimentos realizados variaram em tempo e dias de exposição dos

indivíduos às ondas ultrassônicas. Os resultados apresentaram números variados para mortalidade

e desacoplamento das amostras analisadas, havendo diferenças significativas referentes ao tempo

de exposição por experimento e dias em que as amostras foram submetidas. Assim, o uso do

ultrassom para a desincrustação e morte dos mexilhões dourados foi eficiente e pode ser uma

alternativa ao controle da invasão do L. Fortunei.

Palavras-chave: Moluscos bivalves. Incrustação. Controle.

**ABSTRACT** 

The present study is characterized as an experimental research, carried out in the laboratory, with

the objective of verifying the possible effect of ultrasonic waves to control the invasion of

Limnoperna fortunei (golden mussel). Three experiments were carried out with different numbers

of individuals and for each experiment the sonicator device was using at 40kHz frequency.

Additionally, the procedures performed varied in time and days of exposure of individuals to

ultrasonic waves. The results showed varying numbers for mortality and decoupling of the

analyzed samples, with differences regarding the exposure time per experiment and days in which

the samples were submitted. Thus, the use of ultrasound to descale and kill the golden mussels was

efficient and may be an alternative to control the invasion of *L. fortunei*.

**Keywords**: Bivalve mollusks. Fouling. Control.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Equação do comprimento de onda	14
Figura 2: Frequências de ondas sonoras: infrassom, audível e ultrassom	15
Figura 3: Equação da intensidade acústica	16
<b>Figura 4</b> : Efeito da frequência 25 KHz na inativação de coliformes totais e <i>Escherichia col</i>	!i 18
<b>Figura 5</b> : Efeito da frequência 40 KHz na inativação de coliformes totais e <i>Escherichia col</i>	!i 18
<b>Figura 6</b> : Exemplar de <i>L. fortunei</i> , coletado no Rio Grande em abril de 2022	20
Figura 7: Mapa do histórico da invasão do mexilhão dourado na América do Sul	21
Figura 8: Fases do desenvolvimento larval de um mexilhão	22
<b>Figura 9</b> : Aglomerado de mexilhões-dourados em substrato, coletado em junho de 2022	24
Figura 10: Local da coleta dos mexilhões.	32
Figura 11: Mexilhões-dourados coletados no Rio Grande, em abril de 2022	33
Figura 12: Mexilhões-dourados coletados em descanso no aquário	33
Figura 13: Lavadora Ultrassônica 2840 DA, utilizada no experimento	34
Figura 14: Fluxograma dos procedimentos do primeiro experimento	35

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Taxonomia do mexilhão-dourado, baseado em Simas (2018)	20
<b>Tabela 2</b> : Métodos físicos para controle de <i>L. fortunei</i> , baseado no MMA e IBAMA (2017)	28
Tabela 3: Amostras de mexilhões-dourados, segundo experimento	36
Tabela 4: Amostras de mexilhões-dourados, terceiro experimento	37
<b>Tabela 5</b> : Resultados do terceiro experimento, com substrato rochoso	41

# LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Mortalidade observada no primeiro experimento	38
Gráfico 2: Resultados dos quatro dias do segundo experimento	40
<b>Gráfico 3</b> : Resultados quantitativos do terceiro experimento, sem substrato rochoso	43

# **SUMÁRIO**

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	13
3 REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1 Ondas ultrassônicas	14
3.2 Limnoperna fortunei, o Mexilhão-Dourado	19
3.3 Tratamento e controle: possibilidades	27
4 METODOLOGIA	31
4.1 Coleta das amostras	32
4.2 Aparelho sonicador	34
4.3 Primeiro experimento	34
4.4 Segundo experimento	35
4.5 Terceiro experimento	36
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1 Primeiro experimento	38
5.2 Segundo experimento	39
5.3.1 Com substrato	40
5.3.2 Sem substrato	42
6 CONCLUSÕES	44
REFERÊNCIAS	45

# 1 INTRODUÇÃO

Em 1991, *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857), também conhecido como mexilhão-dourado, foi encontrado na foz do rio da Prata e, a partir de então, tem se expandido rapidamente, principalmente pelos rios Paraguai e Paraná. O tráfego de embarcações entre a Argentina e o Brasil tornou-se umas das principais causas da dispersão do mexilhão dourado (DINIZ, 2010). Essa espécie invasora é originária do Sudeste Asiático e se espalhou pela América do Sul através da água de lastros dos navios vindos da China (RIBOLLI et al., 2021).

Esse molusco bivalve possui grande capacidade de proliferação, que se deve às suas características morfológicas, como suas conchas e sua característica séssil, além de sua evolução moldada pelo meio (PAULA et al. 2021). Assim, é esperado que espécies exóticas invasoras sem controle de sua proliferação se tornem um problema ambiental, social e econômico em ambientes que originalmente não são seu habitat natural (IBAMA, 2020).

A invasão dos mexilhões-dourados, por exemplo, gera inúmeras consequências ambientais, comprometendo biomas, lagos, coberturas vegetais, a qualidade da água, entre outros. A liberação de material orgânico (pseudofezes) por estes organismos afeta a comunidade fitoplanctônica e zooplanctônica, causando a perda de habitat para algumas espécies de peixes e outros organismos (IBAMA, 2020).

No que se refere às tecnologias desenvolvidas pelo homem, as usinas hidrelétricas são uma das principais estruturas que sofrem com a invasão do mexilhão-dourado (PAULA et al., 2021). Além disso, os tanques-rede também são afetados significativamente pela incrustação dos mexilhões-dourados (COSTA et al. 2012). Ao se detectar a presença de larvas em águas de lastros de embarcações contaminadas, deve-se desenvolver estratégias de controle para evitar novas contaminações e intensa propagação da espécie, mitigando seus impactos (SANTOS; WÜRDIG; MANSUR; 2005).

A primeira Estratégia Nacional sobre Espécies Exóticas Invasoras definiu critérios para análise e classificação das espécies e, conforme a Resolução CONABIO nº 5, de 21 de outubro de 2009, o mexilhão-dourado pode ser categorizado como uma espécie exótica e invasora, uma vez que sua dispersão se traduz em riscos sociais, econômicos e ambientais. Dessa forma, é importante desenvolver estratégias de mitigação e contenção de sua dispersão e/ou impacto (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2009).

Métodos de controle com ondas ultrassônicas para os mexilhões-dourados nas usinas hidrelétricas ainda são temáticas não havendo uma quantidade expressiva de estudos relacionados, porém, sua aplicação tem se mostrado significativa (PEREIRA, 2012). A elaboração de uma

análise em torno dessa espécie exótica, explorando as técnicas ultrassônicas, mostra-se promissora para cumprir com os objetivos de contenção e controle da proliferação do *L. fortunei*, bem como consequência amenizar suas implicações no ambiente, sociedade e economia.

# **2 OBJETIVOS**

a) Geral:

Verificar o efeito de ondas ultrassônicas no controle dos mexilhões-dourados.

- b) Específicos:
- Realizar e divulgar a técnica ultrassônica para o controle do mexilhão-dourado;
- Compreender, na literatura, como as invasões do *Limnoperna fortunei* afetam indústrias e ambientes, e as possibilidades de controle;
- Avaliar a influência das ondas ultrassônicas no controle dos mexilhões-dourados sob diferentes intervalos de tempo.

# 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Ondas ultrassônicas

Conforme Almeida e Silva (2005), na Física, dá-se o nome de acústica ondulatória à área que se ocupa em estudar as particularidades das ondas sonoras. Elas apresentam características como intensidade, frequência e timbre, que permitem diferenciar os sons, bem como a amplitude deles. Diante da análise de objetos que reproduzem ruídos distintos, a acústica vale-se de seus mecanismos e conceitos para compreender o fenômeno ondulatório.

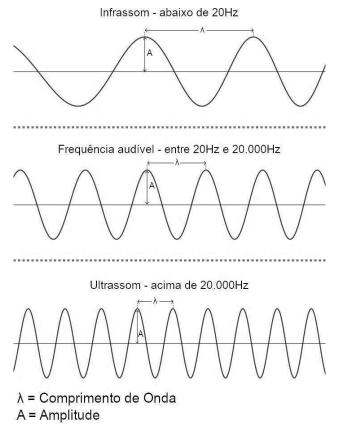
O som pode ser definido como ondas mecânicas de vibração da matéria, ou de partículas que se propagam através de materiais sólidos, líquidos e gasosos (STEIN, 2017). Para os organismos, atua como uma forma de sentir e compreender as perturbações do ambiente, gerando melhor percepção e adaptação. As ondas sonoras necessitam de um meio para se propagarem, portanto, elas não se propagam no vácuo (BISCEGLI, 2003).

Para compreender melhor esses parâmetros, a Figura 1 apresenta a equação do comprimento de onda ( $\lambda$ ), que é "definido como a distância que separa dois pontos consecutivos que vibram na mesma frequência. Pode ser obtido através da velocidade (V) e frequência (f)".



**Figura 1**: Equação do comprimento de onda. **Fonte:** Adaptado de Polachini (2015).

A frequência da onda sonora é medida em Hertz (Hz) que, segundo Dadam (2019), representa as vibrações por segundo de um evento periódico. As frequências que podemos ouvir, como indica a Figura 2, compreendem as ondas entre 20 e 20 mil Hertz. Abaixo dessa frequência temos o infrassom e, acima, o ultrassom. Quanto maior é a frequência do som, mais alto ele se torna.



**Figura 2**: Frequências de ondas sonoras: infrassom, audível e ultrassom. **Fonte:** Elaborado pela autora (2022).

Vale frisar que a altura do som, em si, não é o que define se irá ou não afetar a audição da pessoa que o ouve. Segundo Covo (2016, p. 19-20),

[...] a altura é um parâmetro que associa a frequência da onda à percepção de som grave, médio ou agudo. Sons graves possuem frequências baixas e sons agudos possuem frequências altas [...]. Mesmo sendo inegável a relação direta entre altura e frequência, a percepção de grave, médio ou agudo se dá de maneira subjetiva em cada sujeito, podendo até mesmo em um único sujeito provocar uma percepção diferente de altura de um para o outro ouvido. Em geral, cada pessoa possui uma própria percepção de altura.

Dessa forma, além do fator subjetivo do sujeito que ouve o som, percebe-se, consoante com Júnior (2012), que o ouvido humano não é capaz de receber as frequências ultrassônicas de modo sequencial e essa característica se enquadra na Lei de Weber-Fechner na qual as percepções oscilam conforme os logaritmos de estímulos produzidos por elas.

Portanto, a amplitude de onda, referente à frequência em Hz não é fator determinante para afetar a audição, mas sim a intensidade (amplitude da onda sonora), sendo uma unidade de medida definida pelo Sistema Internacional de Medida (SI), como decibel, representado pela sigla dB (VARELA; COSTA; OLIVEIRA, 2017). A unidade bel (B) foi inventada por engenheiros do laboratório de P&D da *American Telephone and Telegraph* dos Estados Unidos (Bell Labs), em homenagem ao fundador do laboratório Alexander Graham Bell (COVO, 2016).

A intensidade relaciona-se com a quantidade de energia presente na vibração, que pode ser de maior ou menor amplitude "A", conforme Figura 1 apresentada. Para Halliday, Resnick e Walker (2012), a energia existente na onda atravessa a superfície conforme a taxa média por unidade de área. Assim, ela depende da potência da fonte sonora.

Nos apontamentos de Polachini (2015), a intensidade de uma onda sonora pode ser definida como uma energia média transmitida através de uma unidade de área perpendicular à direção de propagação e pode ser representada pela equação da intensidade acústica (Figura 3).

$$I = \frac{P_A^2}{2\rho c}$$

$$I = \text{intensidade acústica (W/m²)}$$

$$P_A = \text{pressão acústica máxima (atm)}$$

$$\rho = \text{densidade do meio (kg/m³)}$$

$$c = \text{velocidade da onda (m/s) ao se propagar no meio.}$$

**Figura 3**: Equação da intensidade acústica. **Fonte:** Adaptado de Polachini (2015).

O ultrassom possui frequências de ondas muito rápidas, a partir de 20 mil Hertz, ou 20kHz, e que, de acordo com Bassoli (2001), são ondas mecânicas transmissoras de energia, ou pulsos elétricos, que apresentam características das demais, como o comprimento, a amplitude, o período e a frequência. Ao se propagarem, elas acarretam agitação nas moléculas do ambiente, além de oscilações no meio líquido, sólido ou gasoso, produzindo "calor profundo pela propagação das suas ondas mecânicas, que são essencialmente as mesmas das ondas sonoras, mas com uma frequência mais alta" (BLUME et al., 2005).

Após a descoberta das ondas ultrassônicas, no início do século XX, suas aplicações se multiplicaram e, hoje, elas são usadas para inúmeras finalidades. A aplicação do ultrassom iniciouse em 1917 para a detecção de submarinos. Mais adiante, foi descoberto que o ultrassom causava aumento da temperatura de tecidos biológicos, sendo introduzido como recurso terapêutico. Desde então, ele vem sendo utilizado nas diversas áreas da medicina, biologia e indústria, sendo cada vez mais estudado para novas finalidades (BASSOLI, 2001).

O uso de ultrassom de baixa intensidade iniciou-se pela aplicação em ramos como metalurgia, medicina e a própria tecnologia de alimentos. [...] Caracterizações de propriedades físicas, por exemplo, são baseadas nos parâmetros das ondas acústicas fornecidos ao passarem por um material (POLACHINI, 2015, p. 32)

A aplicação das técnicas ultrassônicas acontece a partir de alterações nas estruturas químicas envolvidas, denominada sonólise, e pode ser realizada em inúmeros processos para a proteção ambiental. Um exemplo é a remoção de contaminações químicas, utilizando o ultrassom em combinação com outras técnicas (ROCHA; MAINIER; ALVES, 2011). De acordo com Dias et al. (2014, p. 2), as técnicas ultrassônicas baseiam-se "na formação de ondas ultrassônicas de alta frequência capazes de provocar cavitação devido aos ciclos de expansão e contração sofridos pela matéria". Reforçando acerca desse processo, Tomitão (2018, p. 11) disserta que:

Associado a reação de precipitação química, tem-se também a sonoquímica, a qual utiliza aparelhos de banho ultrassônico (que fornece uma frequência menor, porém trata-se de um equipamento acessível em grande parte dos laboratórios de pesquisa) [...] O fenômeno responsável por este método é a cavitação acústica, que provoca a formação, o crescimento e o colapso de bolhas (cavidades de vapor e gases) no meio líquido. Apesar de possuírem tempo de vida extremamente curto, essas bolhas produzem temperaturas elevadas após seu colapso (~5000 °C) e altas pressões, acelerando as reações químicas de precipitação.

A cavitação acústica é um dos principais efeitos do ultrassom no líquido ao qual é suportado, tal qual ocorre, geralmente, nas frequências entre 20kHZ a 1000kHz.

Como qualquer onda sonora, o ultrassom é transmitido em um meio, através de ondas que alternadamente comprimem e expandem a estrutura molecular deste meio pelo qual percorrem, de forma a constituir um ciclo. Na etapa de compressão, as ondas exercem uma pressão positiva no líquido que as suportam, comprimindo as moléculas, enquanto que, no momento da expansão exercem uma pressão negativa, expondo as moléculas a um movimento contrário, de dispersão. Na etapa de rarefação (expansão) microbolhas ou cavidades contendo o líquido vaporizado ou gases previamente dissolvidos no líquido são formadas. Durante o subsequente colapso destas bolhas, na etapa de compressão do ciclo, altas energias são geradas no interior das bolhas, [...] envolvendo pressões de centenas de atmosferas e temperaturas de milhares de graus em pontos localizados no líquido, e que são responsáveis pelos efeitos na sonoquímica. Os efeitos químicos e mecânicos do colapso das bolhas serão absorvidos em duas regiões distintas: dentro da própria bolha, que pode ser identificado pela elevação da temperatura e da pressão e nas imediações da bolha, no qual a onda de choque produzida em colapso irá criar enormes forças de cisalhamento (RONCHI, 2014, p. 74).

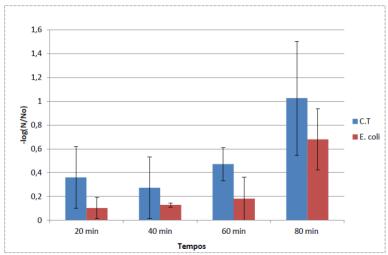
Sobre o efeito da cavitação, Pereira (2012) salienta que essa pode causar a destruição de micro-organismos nos líquidos por meio de esforços mecânicos.

No levantamento de Grando et al. (2016, p. 197), os autores compreendem que

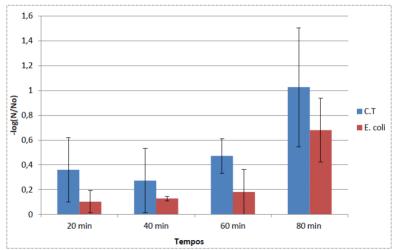
[...] as forças de cavitação induzidas durante o colapso de bolhas são conhecidas por causar muitos efeitos físicos e químicos, por exemplo, a lise das moléculas, resultando na formação de radicais livres, aumentando as taxas de reações químicas.

Medeiros, Lazarotto e Volpatto (2019) estudaram a possibilidade de utilizar o ultrassom, especificamente nas frequências de 25KHz e 40 KHz, como desinfetante alternativo para esgoto

doméstico previamente tratado por processo anaeróbio, com a intenção de remover material orgânico – nos parâmetros de Demanda Química de Oxigênio (DQO). Os autores (2019) concluem que o maior tempo de exposição ao ultrassom apresenta maior poder desinfetante, conforme apresentam as Figuras 4 e 5.



**Figura 4**: Efeito da frequência 25 KHz na inativação de coliformes totais (C.T) e *Escherichia coli*. **Fonte:** Medeiros, Lazarotto e Volpatto (2019).



**Figura 5**: Efeito da frequência 40 KHz na inativação de coliformes totais e *Escherichia coli*. **Fonte:** Medeiros, Lazarotto e Volpatto (2019).

Acerca dos efeitos diversos do ultrassom, Blume et al. (2005, p. 56) afirma o seguinte:

[...] os efeitos dependem de muitos fatores físicos e biológicos, tais como a intensidade, o tempo de exposição, a estrutura espacial e temporal do campo ultra-sônico e o estado fisiológico do local a ser tratado. Este grande número de variáveis complica a compreensão exata do mecanismo de ação do US na interação com os tecidos biológicos.

Grando et al. (2016) observaram o uso das ondas ultrassônicas na clarificação de efluente de indústria láctea, e perceberam o processo de coagulação/floculação associado ao ultrassom como técnica promissora. Os dados estatísticos do estudo dos autores Grando et al. (2016)

apontaram para uma significante remoção de turbidez e de sólidos e redução de matéria orgânica nas amostras, bem como uma melhora no visual das mesmas.

Zotti (2016) afirma que a utilização de banho de ultrassom em Varronia curassavica (erva baleeira), Lippia origanoides (alecrim-pimenta) e Ocimum gratissimum ("alfavacão" ou manjericão-cheiroso) é capaz de reduzir o tempo de secagem dessas três espécies, sem ocorrer variação significativa na coloração das folhas.

Um dos métodos de tratamento ultrassônico ambiental que vem sendo estudado é o uso em água de lastro de embarcações marítimas. Neste método, ondas mecânicas ultrassônicas com frequências variando entre 15 e 100 KHz são emitidas na água para eliminar os organismos presentes (PEREIRA, 2012).

Ao estudarem a biodiversidade de micro-organismos eucariontes, Landell e Broetto (2020) atestam que a "sonicação (submissão da amostra a ondas de ultrassom) pode ser usada para isolar organismos epibiontes ou que estejam mais fortemente aderidos ao sedimento".

Guimarães (2019) realizou pesquisa acerca do efeito do ultrassom no comportamento natatório de larvas meroplanctônicas em fase de assentamento. A autora considera, a partir dos resultados obtidos, que o ultrassom afeta o comportamento das larvas *cypris* (infraclasse *Cirripedia*, da classe *Maxillopoda*), podendo causar diminuição na taxa de assentamento, reforçando a possibilidade do uso do ultrassom como método anti-incrustante.

# 3.2 Limnoperna fortunei, o Mexilhão-Dourado

(Dunker, 1857) é um mexilhão de água doce (Figura 6).



**Figura 6**: Exemplar de *L. fortunei*, coletado no Rio Grande em abril de 2022. **Fonte**: Acervo da autora (2022).

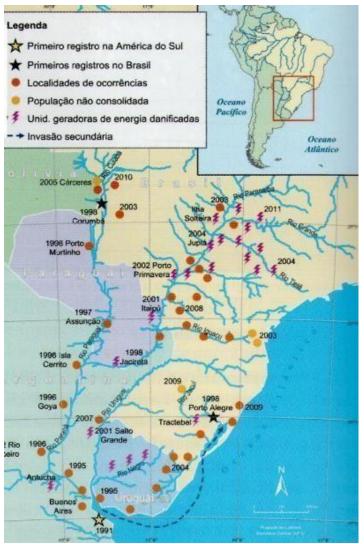
Segundo definições apontadas por Simas (2018), a Tabela 1, a seguir, apresenta a taxonomia dessa espécie:

**Tabela 1** – Taxonomia do mexilhão-dourado, baseado em Simas (2018).

	dourado, baseado em simas (2010).
Categoria	Classificação
Reino	Animalia
Filo	Mollusca
Classe	Bivalvia
Ordem	Mytilida
Superfamília	Mytiloidea
Família	Mytilidae
Gênero	Limnoperna
Espécie	Limnoperna fortunei

De pequeno porte, em sua fase adulta alcançando tamanhos entre 3 e 4 centímetros, essa espécie exótica de molusco bivalve possui origem na China e se expandiu para outros países da Ásia e da América do Sul (IBAMA, 2020). Se alimenta principalmente de fitoplâncton, zooplâncton e partículas orgânicas suspensas decorrentes da filtragem de água (CORDEIRO et al., 2016).

A figura a seguir apresenta um mapa do histórico da invasão do mexilhão dourado na América do Sul.



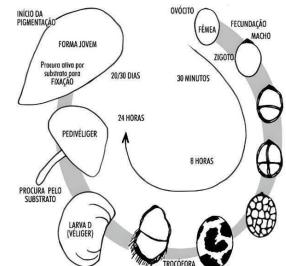
**Figura 7**: Mapa do histórico da invasão do mexilhão dourado na América do Sul. **Fonte:** Mansur et al. (2012)

Para Pereira, Colares e Vieira (2019), os três principais períodos de vida do mexilhão-dourado observados na natureza são: fase larval, juvenil e adulta. Algumas características do ciclo de vida do *L. fortunei*, como o estágio larval planctônico e estágio adulto incrustante, podem facilitar sua dispersão entre ambientes, pois o estágio larval é facilmente disperso pela água corrente, enquanto o estágio adulto é disperso pelo tráfego de embarcações colonizadas. Dessa forma, os estágios larvais são considerados o principal estágio para sua propagação, e sua liberação pode coincidir com o período de cheia, o que facilita sua entrada em novos ambientes (SILVA, 2021).

Marenzi e Westphal (2011, p. 295) detalham as fases do desenvolvimento larval de um mexilhão da seguinte maneira

A fecundação ocorre na água, onde a fêmea libera os ovócitos e o macho os espermatozoides. Estas células se encontram na água, onde são formados os ovos e destes eclodem as larvas. A primeira larva é denominada trocófora. Esta larva é ciliada e se transforma em uma segunda fase larval denominada de larva D, que se modifica em véliger, a qual já possui uma concha com característica de sua espécie e, em seguida, dá origem a pedivéliger. É a pediveliger, que apresenta um pé e o ocelo e dá origem a semente, que é a fase em que o bivalve torna-se séssil.

# A Figura 8 representa de forma sucinta essas fases:



**Figura 8**: Fases do desenvolvimento larval de um mexilhão. **Fonte:** Adaptada de Marenzi e Westphal (2011).

De acordo com Iwasaki (2015), após o desenvolvimento larval, as larvas de *L. fortunei* se encrustam preferencialmente na parte inferior sombreada de pedras, parte superior de túneis, rachaduras, substratos duros e, geralmente, selecionando locais já colonizados por outras espécies coespecíficas. No geral, a seleção de locais é impulsionada por vantagens adaptativas e é fator importante na incrustação dos mexilhões-dourados. Além disso, sobre a adaptação do *L. fortunei*, Giglio (2016) observa que a capacidade reprodutiva e a tolerância a condições extremas do ambiente são alguns dos principais fatores que permitem a travessia de barreiras nos habitats invadidos. Outro fator é apontado por Xia et al. (2021), a saber que a espécie possui grande tolerância a temperaturas baixas.

O principal meio que viabilizou a invasão em outros habitats por parte de populações de mexilhões-dourados e outras invasões biológicas, como a do mexilhão- zebra e dos corais invasores *Tubastraea* spp., foram as incrustações em águas de lastro dos navios, além de incrustação em plataformas de petróleo/gás e em cascos de embarcações (BATISTA, 2018; SILVA, 2014).

A água de lastro passou a ser, para o mundo globalizado, uma preocupação relacionada às questões ambientais. [...] Apesar de sua importância para uma segura operação do navio, a água de lastro é também reconhecida, juntamente com a bioincrustação presente no casco do navio (obras-vivas), como um dos principais vetores para introdução de espécies aquáticas potencialmente invasoras (BATISTA, 2018, p. 175).

Para Silva et al. (2021), a disseminação do *L. fortunei* é muito mais extensa do que se sabe, em conta do tráfego intenso de embarcações nos rios brasileiros, sobretudo para a pesca, que acontece sem quaisquer medidas de controle contra a propagação do molusco. A falta dessas medidas culmina na rápida propagação de incrustações no casco, iscas vivas de pesca ou mesmo a água dentro do barco e motor.

Segundo o Plano Nacional de Prevenção, Controle e Monitoramento do Mexilhão-dourado, no Brasil, "o mexilhão-dourado é um molusco de água doce pouco seletiva quanto aos habitats aquáticos, podendo viver em regiões litorâneas de lagos, lagoas, lagunas e represas, margens e canais de rios e arroios" (IBAMA, 2020, p. 21).

Os efeitos das mudanças globais e da globalização na biosfera foram os principais fatores que estimularam as invasões de espécies oriundas de outros ecossistemas, fazendo com que as Américas recebessem, principalmente a partir de cargas vindas de outros países, grandes quantidades de espécies de vida aquática. Sua rápida reprodução evidencia que a proliferação é grande e contínua, podendo acontecer durante 6 a 10 meses no ano. A maturidade sexual dessa espécie acontece já no primeiro ano de vida e uma única fêmea pode gerar até 28 mil ovos (DARRIGRAN; DAMBORENEA, 2011; IBAMA, 2020; VIDAL, 2019). A pesquisa de Camargo et al. (2021b) evidencia que, em laboratório, com condições do ambiente semelhantes às do habitat natural do *L. fortunei*, é possível ocorrer a desova da espécie, possibilitando sua reprodução.

De acordo com Paula et al. (2021), no Brasil, o mexilhão-dourado está fixado nas regiões Sul e Sudeste, entretanto, mais recentemente percebeu-se sua existência na divisa entre os estados da Bahia e de Pernambuco.

Segundo estudos de Darrigran e Damborenea (2011), os mexilhões-dourados se aglomeram em seus habitat naturais em raízes e substratos, formando os chamados 'macroaglomerados' e, ainda, as superpopulações de mexilhão-dourado podem atingir elevada densidade, algo em torno de 150 mil espécimes por metro quadrado em ambientes naturais, e 240 mil espécimes por metro quadrado em estruturas construídas pelo homem.



**Figura 9**: Aglomerado de mexilhões-dourados em substrato, coletado em junho de 2022 (escala aproximada referente ao tamanho médio dos indivíduos). **Fonte:** Acervo da autora (2022).

Segundo Santos et al. (2012), essas incrustações são volumosas, pois os indivíduos se sobrepõem entre si, fixando-se uns aos outros e ao substrato por feixe de filamentos denominado bisso. A inscrustação é bastante compacta, uma vez que os indivíduos menores preenchem os espaços dos maiores, formando assim macroaglomerados resistentes à força da correnteza.

Além dos substratos duros, como troncos e pedras, *L. fortunei* também se fixa sobre vários animais bentônicos como bivalves, gastrópodes e crustáceos, prejudicando-os ou levando-os à morte precoce, interferindo deste modo na biodiversidade bentônica (SANTOS et al., 2012, p. 27).

Esses aglomerados e superpopulações de mexilhões dourados, além de ser sabido que causam muitos prejuízos à biodiversidade, acumulam-se em diversas instalações construídas pelo homem, causando obstruções em canos e filtros, dentre outras estruturas, trazendo prejuízos econômicos (SILVA et al., 2020).

Amplamente documentados, os impactos da invasão por parte dessa espécie exótica no Brasil são diversos, desde ambientais até econômicos. A facilidade com a qual o mexilhão-dourado invade, se prolifera e incrusta no ambiente, para Paula et al. (2021), acontece por conta de suas características morfológicas, como o fato de possuir as suas duas conchas que protegem o corpo do molusco e sua reprodução se dar através de fertilização externa. Além disso, a característica séssil da espécie faz com que a incrustação aconteça mais facilmente.

Nesse aspecto, outro apontamento relevante é dado por El Haj, Bohn e Souza (2019), os quais concluem que bivalves invasores, em especial o *L. fortunei*, são notavelmente mais tolerantes à toxidade do que as espécies nativas, resistindo a ambientes contaminados sem sofrer dano em

sua fisiologia. O mexilhão dourado ainda é mais resistente a outras condições, como alta temperatura, baixo pH e cálcio, além de poluição da água (KARATAYEV et al., 2007).

No Brasil, a pouca conservação dos ambientes aquáticos pode facilitar a proliferação de espécies invasoras (FREIRE; MARAFON, 2018). É possível compreender essa facilidade do *L. fortunei* em invadir ambientes aquáticos mal preservados, uma vez que sua resistência a condições diversas abre vantagem para o mexilhão dourado em comparação às espécies nativas que tiveram seu ambiente degradado.

A invasão do *L. fortunei* pode causar mudanças nos ecossistemas, competindo com espécies nativas por substrato e outros recursos, levando ao seu deslocamento e causando sérias alterações nas cadeias alimentares de lagos e rios, através da filtração do plâncton, alterando o habitat físico. Além disso, como consequência pode aumentar a clareza da água e criar densos leitos de conchas que podem beneficiar alguns invertebrados (SILVA et al., 2020).

Segundo Paolucci et al. (2017), a presença de mexilhões invasores, como é o caso do *L. fortunei*, é causadora do aumento na florescência de cianobactérias. Tal ocorrência não somente reduz a disponibilidade de presas, como também reduz a atividade de alimentação de peixes, além de afetar o desenvolvimento embrionário e sobrevivência destes.

No lago Guaíba, localizado na região metropolitana de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, ao fim do ano de 1998 foram registrados os primeiros casos da invasão do *L. fortunei* no Brasil. Sua introdução ocorreu através de larvas presentes na água de lastro de navios. Após dois anos da invasão do mexilhão-dourado nesse lago, foram observadas macro incrustações com população estimada de 140.000 indivíduos por m². Isso causou uma série de danos à fauna bentônica nativa e à vegetação ripária, desencadeando a diminuição das mesmas. Além de prejuízos econômicos em decorrência do entupimento de poços de captadoras de água, grades e encanamentos de estações de abastecimento de água e refrigeração de indústrias no entorno do lago (SANTOS; WÜRDIG; MANSUR, 2005).

Um dos atingidos pela incrustação do mexilhão-dourado são os hidrogeradores. Dentre outros componentes, as turbinas hidráulicas são expressivamente afetadas:

As incrustações por mexilhão-dourado afetam as regiões da máquina hidráulica, onde vazões e pressões possuem valores baixos. Desta forma, o mexilhão-dourado se fixa principalmente em tubulações e em sistemas auxiliares da máquina hidráulica, como por exemplo, o sistema de resfriamento de óleo, constituído basicamente de trocadores de calor e tubulações (FELIX, 2011, p. 17).

De acordo com Guimarães (2019, p. 1), as bioincrustações causam efeitos diversos, e esses "apresentam consequências tanto no âmbito econômico quanto ambiental e social, fortalecendo a necessidade de desenvolvimento de medidas preventivas aos efeitos da

bioincrustação". Além disso, conforme apontam Bergmann et al. (2010, p. 22), a

[...] espécie se fixa aos substratos por meio de filamentos de bisso formando incrustações maciças, diferindo dos demais bivalves límnicos nativos e invasores que se enterram no sedimento. A magnitude das incrustações do mexilhão dourado é semelhante a das incrustações formadas pelo mexilhão azul (*Mytilus edulis* Linnaeus, 1758), que vive em ecossistemas marinhos e estuarinos.

Karatayev et al. (2007) consideraram o *L. fortunei* como uma espécie engenheira de ecossistemas, sendo capaz de alterar as estruturas e até mesmo o funcionamento de ecossistemas. Dentre as inúmeras consequências causadas pela proliferação do mexilhão dourado na natureza, destacam-se os impactos em ambientes aquáticos, como perda de cobertura vegetal em lagos, formação de colchões contínuos sobre substrato arenoso, que afetam a comunidade fitoplanctônica e zooplanctônica, acarretando em decréscimo de densidade e biomassa, mudanças na composição e na produtividade, entre muitas outras variáveis.

Observa-se a alteração da dieta da ictiofauna em diferentes ambientes, constatando ao menos 18 espécies de peixes se alimentando de *L. fortunei*, trazendo como principal exemplo a espécie *Leporinus obtusidens* (conhecido como Piau Verdadeiro, encontrado em toda a bacia do Rio Prata), aferindo que a maior parte da alimentação dessa espécie baseava-se em plantas aquáticas e sementes, mas que após a invasão do mexilhão-dourado no ambiente verificou-se que o *L. fortunei* passou a compor entre 64% a 100% do conteúdo estomacal desses peixes (SIMAS, 2018).

Outro problema relevante documentado é a qualidade da água, bastante afetada pela invasão, elevando teores de amônia, nitrato e fosfato; aumentando a relação fósforo/nitrogênio; aumento na transparência da água, por conta da capacidade de filtração dos adultos; e diminuição do séston, fitoplâncton e produtividade primária (IBAMA, 2020).

Besen e Marengoni (2019) consideram a piscicultura nos tanques-rede dos reservatórios de usinas hidrelétricas como grande contribuinte para a produção aquíloca nacional. Entretanto, as incrustações de mexilhão-dourado nas telas desses tanques-rede tem sido um problema notável no processo. Com relação aos impactos econômicos, percebe-se que atinge, principalmente, o setor de geração de energia, uma vez que danifica e reduz a eficiência de equipamentos. Os principais danos estruturais causados por esses invasores no setor elétrico se encontram nos equipamentos de resfriamento, grades, filtros, turbinas, bombas, tubulações, túneis, entre outros. Segundo estudos, as paralisações e os intervalos para a manutenção podem gerar custos expressivos de dezenas de milhares até milhões de reais (IBAMA, 2020).

Os primeiros casos da invasão do *L. fortunei* na América do Sul foram registrados em 1991 (SILVA et al., 2016). Conforme Darrigran (1995), foi relatada a presença de *L. fortunei* na Estação

de Tratamento de Água de La Plata, na Argentina. Além disso, sistemas de irrigação e pisciculturas também podem ser afetados, como em Tacuarí – Uruguai, quando a malha do tanque rede de peixe esturjão foi completamente tomada por colônias de mexilhões, impossibilitando a sobrevivência dos animais pela falta de oxigenação (SARDIÑA; CATALDO; BOLTOVSKY, 2008). Avelar, Martim e Vianna (2004) relataram a primeir presença do *L. fortunei* no estado de São Paulo, no rio Paraná.

Boltovyskoy e Cataldo (1999) afirmaram que a inserção dos mexilhões em instalações industriais acontece em fases iniciais de seu desenvolvimento. Ainda em consonância com os mesmos autores, as larvas penetram na captação da água, alterando o funcionamento dos processos de produção. Nesse ambiente, elas fixam- se em um substrato duro, como metal, plástico, entre outros; e aumenta rapidamente, na maioria das vezes, tampando tubulações, turbinas e canos.

Para Mansur et al. (2003), a fixação do *L. fortunei* pode causar principalmente: diminuição da passagem e da velocidade de água nas tubulações, entupimentos em sistemas coletores de água, contaminação da água por mortandade em massa, obstrução de bombas, filtros e sistemas de resfriamento. Isso traz enormes prejuízos financeiros para as hidrelétricas que, além da necessidade de manutenções constantes nas máquinas, precisam contratar profissionais adequados.

De acordo com dados da CEMIG (2014), entre os anos de 1993 e 1999, nos Estados Unidos foram gastos US\$ 3,1 bilhões em usinas no combate ao mexilhão- dourado, o que representa um valor significativo para o setor. No Brasil, Lopes et al. (2010) destacam que grande parte das hidrelétricas captam a água à montante, no sistema de resfriamento aberto, sem tratá-la. Isso as tornam mais vulneráveis, tendo em vista que os efeitos criados pela bioincrustação são diversos e que o ingresso do *L. fortunei* acontece naturalmente. Em escala global e mais recentemente, Haubrock et al. (2022) apresentam o panorama entre 1980 e 2020, mostrando que o custo anual por danos advindos de incrustação por bivalves de água doce apresentou média acima de 1 trilhão de dólares por década.

Adelino et al. (2021) observam que no Brasil, no período entre 1984 e 2019, foram reportados custos de no mínimo 105,3 bilhões de dólares decorrentes dos danos causados pelas espécies invasoras. Observaram ainda que os custos com prejuízos por perdas e danos, causados por invasões biológicas, são significativamente superiores aos custos de prevenção, controle e erradicação de espécies exóticas invasoras. Dessa forma, percebe-se que os gastos com os danos causados, além de ser muito grandes, podem ser reduzidos e/ou evitados com investimentos em tratamento e controle.

# 3.3 Tratamento e controle: possibilidades

De uma forma ampla, é possível considerar três tipos de controle populacional para o L.

fortunei: controle físico, controle químico e controle biológico (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA; IBAMA, 2017). Segundo Rosa e Assis (2020, p. 226),

os métodos físicos, ao contrário dos métodos químicos, "apresenta menor impacto ambiental, por não liberar resíduos tóxicos nos ambientes aquáticos".

Considerando o ultrassom como um controle do tipo físico e proativo, a Tabela 2 apresenta os principais tipos de controle físico, bem como, uma breve descrição desses processos, de forma a apresentar uma síntese comparativa entre estes métodos de controle.

**Tabela 2** – Métodos físicos para controle de *L. fortunei*, baseado no MMA e IBAMA (2017).

Processo	Descrição
Raspagem	Remoção mecânica por meio de raspagem, utilizando robôs ou mergulhadores. Processo de alto custo e tempo. Danifica as superfícies dos materiais, podendo causar corrosão.
Filtração	Filtros de areia ou filtros mecânicos autolimpante podem remover larvas do mexilhão-dourado em plantas industriais.
Jateamento	Tratamento reativo, feito por meio de jateamento utilizando bombas de alta pressão. Eficiente pra remover os mexilhões aderidos aos equipamentos, superfícies metálicas e ao concreto
Radiação ultravioleta	Tratamento proativo. Eficaz para inativar larvas de <i>L. fortunei</i> . O elevado teor de sólidos suspensos nos rios sulamericanos é uma grande limitação à aplicação deste método.
Campo magnético	Um dos mais eficientes para inibir o assentamento, podendo ocasionar a mortalidade em no mínimo uma quinzena. Muito utilizada por empresas de captação e tratamento de água no Rio Grande do Sul.
Corrente elétrica	A voltagem de 7 kV pode imobilizar 80% das larvas em condições de fluxo inviabilizando o assentamento.
Ultrassom	Tratamento proativo. A dose de 44kWs/L (>100kHz) pode causar 30% de mortalidade de <i>L. fortunei</i> . Na frequência de 20kHz, pode causar 100% de mortalidade.
Turbulência	Alto fluxo de turbulência aponta para ausência de problemas de incrustação em alguns reservatórios de bacias hidrográficas. No Brasil não há experiências com êxito neste processo. Podem causar até 80% de mortes.

No que se refere ao controle físico, sobretudo ao que se refere à utilização das ondas ultrassônicas, serão citados, a seguir, alguns dos poucos autores que fazem referência à temática.

A tese de Pereira (2012) salienta que o controle físico pode ser realizado através do uso de ondas ultrassônicas As escalas mais baixas de frequência ultrassônicas, entre 15 a 100 kHz, são mais eficientes na destruição de micro- organismos em líquidos (PEREIRA, 2012). Ainda, conforme o autor, a irradiação ultravioleta é uma das principais tecnologias existentes para o controle do mexilhão-dourado. Portanto, ele afirma que

A fonte primária de radiação ultravioleta (UV) é o sol, mas também pode ser emitida através de lâmpadas incandescentes e fluorescentes. O processo de tratamento consiste na irradiação de luz ultravioleta na água do mar captada pelo navio. A luz UV induz mudanças fotoquímicas nos organismos que irão quebrar as ligações químicas no DNA. Isto acarreta problemas na sobrevivência

dos organismos, ou seja, ocorrem mutações nocivas levando- os à morte (PEREIRA, 2012, p. 85).

O estudo de Bergmann et al (2010) mostrou ser possível controlar as incrustações de mexilhões-dourados a partir de materiais e revestimentos antiincrustantes, sendo este um método químico. O aço cobreado, aço inoxidável, aço galvanizado e acrílico foram recomendados para utilização no controle da incrustação em uma usina hidrelétrica no estado de São Paulo. Para os autores,

O aço carbono revestido com tinta a base de resina epóxi poliamina e o respectivo revestimento apresentaram elevados percentuais de redução da bioincrustação, quando adicionados os seguintes óxidos: óxido de zinco convencional 5%, óxido de cobre convencional 10%, óxido de zinco nanométrico 10% (BERGMANN et al., 2010, p. 28-29).

No que se refere a materiais de compostos com ação antiincrustante, Castro, Westphal e Fillmann (2011, p. 1029), concluem que, para que o material seja ideal para a sua finalidade, deve ter:

[...] amplo espectro de ação, a fim de prevenir com eficiência o estabelecimento das várias espécies de organismos que iniciam a formação do biofilme incrustante; baixa toxicidade para mamíferos; baixa solubilidade em água; baixo potencial de bioacumulação e biomagnificação; baixa ou nenhuma persistência ambiental; serem compatíveis com os equipamentos e técnicas de pintura atualmente em uso e, custos e durabilidade competitivos com os produtos atualmente disponíveis no mercado.

Além do método do revestimento, há a possibilidade de realizar os seguintes controles e produtos químicos: ajuste de pH, MXD-100, ozônio, diclorocianurato de sódio, sulfato de cobre, cloreto de *didecyl dimethyl ammonium*, Bayluscid, Bulab 6002, bioencapsulados, cloreto de amônio, dentre outros. No que se refere ao controle biológico, não existem experiências de campo ou produtos registrados para o controle do mexilhão-dourado, havendo apenas algumas informações referentes a estudos de bancada, mediante bioensaios com formulações comerciais de agentes microbianos utilizados para o controle de dípteros (MMA, IBAMA, 2017).

Com o intuito de ampliar as investigações sobre as consequências do mexilhão- dourado, bem como formas de controlá-lo, no dia 22 de outubro de 2015, por meio do Diário Oficial da União, foi publicada a Instrução Normativa nº 17, de 21 de outubro de 2015, que aprovou especificações técnicas do produto moluscicida (MXD-100), com a finalidade de promover o controle dessa espécie exótica invasora em sistemas de resfriamento de usinas hidrelétricas brasileiras.

Faria et al. (2006) conduziram uma metodologia promissora para a avaliação do

desempenho de materiais antiincrustantes nos mexilhões dourados. Ao realizarem estudos, tanto em campo como em laboratório, os resultados obtidos apresentaram diferença significativa. Primeiramente, em laboratório, comprovou-se melhor eficiência na antiincrustação para materiais polimétricos. Por outro lado, em campo, os materiais metálicos apresentaram melhores resultados (FARIA et al., 2006).

De encontro com o que observa Simas (2018), sobre peixes se alimentarem desses mexilhões, Silva et al. (2020) apresentam um estudo onde investigam a possibilidade de peixes predadores serem agentes "biocontroladores" do *L. fortunei*, concluindo que, embora as evidências sejam limitadas, complexas e arriscadas, esse método pode ser a chave para remediar o progresso da invasão.

Diversos estudos para controle de mosquitos da dengue e da malária, por meio da introdução de fêmeas estéreis, foram conduzidos por Mauro Rebelo que, em uma de suas pesquisas, notou que tal técnica poderia ser aplicada ao mexilhão-dourado. Desde então, em parceria com a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), conduz análises por indução de genética da infertilidade para o controle da infestação por mexilhão-dourado. Segundo o site Insight (2019), o projeto se iniciou em 2017 e

[...] está sendo desenvolvido por quatro biólogos e três engenheiros [...], oito pesquisadores da UFRJ e um gerente de integração tecnológica e um biólogo [...]. A primeira fase, realizada de 2017 a 2018, consistiu na coleta dos mexilhões nos reservatórios das usinas hidrelétricas e no sequenciamento de 100% do genoma do molusco. Em seguida, o genoma foi avaliado para identificar quais genes poderiam ser modificados a fim de obter um organismo capaz de se reproduzir com outros na natureza, mas gerando descendentes inférteis. Nessa etapa foram identificados 26 genes potenciais, e a partir disso foi desenvolvido um modelo celular para a modificação com o uso da tecnologia CRISPR/Cas9 [...]. O modelo foi aplicado em organismos vivos e resultou na produção bem-sucedida de espermatozoides geneticamente modificados.

Outro estudo relevante, desenvolvido por Camargo et al. (2021a), diz respeito ao uso de agrotóxicos na agricultura, favorável ao emprego de glifosato (N- fosfonometil glicina). A pesquisa envolveu teste de toxicidade com o gastrópode *límnico Physa acuta* a fim de verificar os efeitos das concentrações de Glifosato 480 AGRIPEC®, a partir do uso de organismos oriundos do cultivo de moluscos dulcícolas no Biotério Nico Nieser. Após deixar as amostras por 14 dias em aquário, com maior concentração de glifosato, chegou-se a 100% de mortalidade dos gastrópodes dulcícolas; ao passo que, concentrações menores tiveram maior taxa de sobrevivência (CAMARGO et al., 2021a).

Gattás et al. (2020) também estudaram o efeito do glifosato em *L. fortunei*. Os autores concluíram que altas concentrações do herbicida em mexilhões dourados causou mortalidade massiva e em concentrações mais baixas, a espécie é capaz de suportar, causando menos

mortalidadePor outro lado, o uso do ultrassom, sendo um método físico, se mostra mais viável em relação ao uso de produtos químicos e gera menor impacto ambiental, pois não libera resíduos tóxicos nos ambientes aquáticos (ROSA; ASSIS, 2020).

O "Plano Nacional de Prevenção, Controle e Monitoramento do Mexilhão- dourado (*L. fortunei*) no Brasil", também chamado de Plano Mexilhão-dourado, conforme IBAMA (2020), teve como meta controlar três espécies exóticas invasoras, de modo a reduzir seus impactos sobre a biodiversidade brasileira. Esse plano estabeleceu, em sua parte I, um diagnóstico inicial, que tratava da Biologia e Ecologia do mexilhão-dourado, trazendo informações referentes à sua taxonomia, atributos, morfologia, reprodução, proliferação, entre outros. Além disso, foram abordados os fatores que envolviam o processo de invasão, em que estabeleceram informações sobre a distribuição geográfica nativa, áreas invadidas, vias de introdução, entre outras. Essa parte ainda diagnosticou métodos de prevenção, erradicação, monitoramento, controle populacional, dentre outros aspectos (IBAMA, 2020).

A segunda fase do Plano abordou o planejamento e a organização para a elaboração, definindo e esclarecendo as etapas. Realizou-se uma consulta pública através do *site* do IBAMA, bem como uma Oficina, que aconteceu no Centro Nacional de Desenvolvimento e Capacitação de Recursos Humanos do IBAMA (Ceduc/IBAMA), em que foram estabelecidas ações de manutenção, controle das bacias invadidas, prevenção da dispersão do mexilhão-dourado, geração de dados e informações, rede de monitoramento e avaliação (IBAMA, 2020). Em relação ao ultrassom, o Plano o definia como uma forma de tratamento proativo, e observa ainda que uma frequência de 20 kHz pode causar 100% de mortalidade do mexilhão-dourado, ao passo que, uma frequência maior que 100kHz causa apenas 30% de mortalidade. Com isso, pode-se concluir que o ultrassom é uma ferramenta relevante para o combate de espécies exóticas nas hidrelétricas.

# **4 METODOLOGIA**

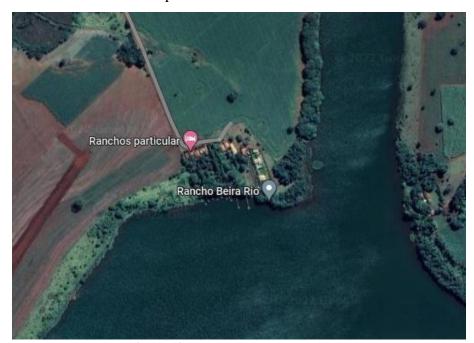
Este estudo trata de uma pesquisa experimental e bibliográfica, partindo da coleta de amostras de mexilhões-dourados retiradas do habitat natural (Rio Grande) com a realização de

experimentos utilizando as ondas ultrassônicas para a desincrustação desses indivíduos.

Foram realizados três ensaios (experimentos), em tempos distintos, com parâmetros semelhantes para a primeira e a última leva de amostras (como a quantidade de indivíduos por amostra, quantidade de água do ambiente e água clorada, temperatura e tempo), com a intenção de que houvesse a observação dos resultados referentes a condições próximas entre os experimentos. O segundo experimento foi realizado com parâmetros bastante distintos dos utilizados nos outros dois, para que fosse possível observar resultados com tempos e quantidades de indivíduos por amostra mais distantes. A seguir, serão detalhados todos esses procedimentos.

## 4.1 Coleta das amostras

Entre os dias 24 e 28 de abril de 2022, retiraram-se as primeiras amostras de mexilhõesdourados no Rio Grande, na área do Reservatório de Volta Grande. O local da coleta foi o Rancho Beira Rio, conforme mostrado no mapa:



**Figura 10**: Local da coleta dos mexilhões. **Fonte**: Google Maps (2022).

A Figura 11, a seguir, apresenta uma fotografia de um aglomerado de mexilhões retirados no local para serem aproveitados nas primeiras amostras.



Figura 11: Mexilhões-dourados coletados no Rio Grande, em abril de 2022. (escala aproximada referente ao tamanho médio dos indivíduos).

Fonte: Acervo da autora (2022).

Foi coletada, junto das amostras de mexilhões dourados, 7 litros e meio de água do habitat desses mexilhões. Junto a essa água, foi adicionada a um aquário mais 7 litros e meio de água declorada, por conta da quantidade de água do ambiente natural não ter sido suficiente para preencher todo o aquário. Os mexilhões-dourados foram aclimatados nesse aquário (Figura 12) por 24 horas antes de iniciar o experimento com a aplicação do aparelho sonicador.



**Figura 12**: Mexilhões-dourados coletados em descanso no aquário. **Fonte**: Acervo da autora (2022).

As dimensões desse aquário são as seguintes: formato retangular, com 60 cm de base, 30 cm de largura e 30 cm de altura. Os mexilhões foram aclimatados em condições do ambiente, modificado pela mistura da água, contendo iluminação artificial e substrato natural trazido do Rio Grande, em aeração por bomba de pedra de oxigênio. As propriedades da água utilizada em todos os experimentos foram: temperatura inicial de 22,5°C; pH 6,62; condutividade 162 μS/cm; turbidez 0 NTU; sólidos dissolvidos 105mg/L; e oxigênio dissolvido superior a 5,0 mg/L.

# 4.2 Aparelho sonicador

O aparelho utilizado (Figura 13) é a Lavadora Ultrassônica 2840 DA Biodont®.



**Figura 13**: Lavadora Ultrassônica 2840 DA, utilizada no experimento. **Fonte**: Acervo da autora (2022)

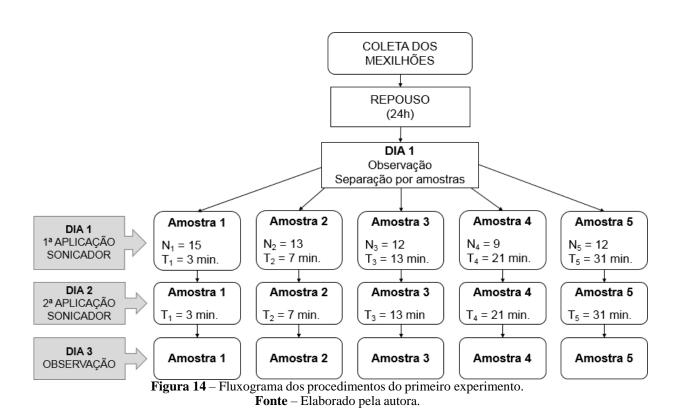
O produto apresenta revestimento externo em aço e cuba interna em aço inox, (ODONTOBRAS, 2022). Seu forte sistema de limpeza ultrassônica baseia-se principalmente na transformação de energia elétrica em energia mecânica, provocando uma vibração mecânica de alta frequência, realizando a chamada "cavitação ultrassônica". Pode trabalhar na frequência de 40kHz, sobretudo para usos clínicos (médicos e odontológicos), e também em 28kHz, preferencialmente para usos industriais (LSO Export & Import, s/d). Para o experimento, foi utilizada a frequência de 40kHz, opção disponibilizada pelo aparelho.

## 4.3 Primeiro experimento

Foi realizado entre os dias 24 e 28 de abril de 2022, sendo a coleta no primeiro dia. Foram coletados, junto às amostras de mexilhões-dourados, 7 litros e meio de água do habitat desses indivíduos. Essa água foi adicionada ao aquário com mais 7 litros e meio de água declorada, mantendo os mexilhões coletados em repouso por 24 horas antes da realização do experimento, para que no dia seguinte fossem observadas possíveis mortes nesse encaminhamento dos mexilhões até o local do experimento.

Após as 24 horas de repouso das amostras, iniciou-se o primeiro dia de experimento com a primeira aplicação do sonicador. Para o experimento, os mexilhões coletados foram separados

em cinco amostras em quantidades (N) diversas. Durante a realização do experimento, cada amostra foi submetida a diferentes tempos (T) no processo de ultrassonicação, sendo eles realizados em ordem decrescente a partir da amostra número 5, respeitando os tempos especificados no fluxograma (Figura 14). Não houve o uso de substrato rochoso. No dia seguinte, os mexilhões sobreviventes foram novamente submetidos ao mesmo processo, com os mesmos tempos. Por fim, no terceiro dia, houve a observação do experimento, analisando a mortalidade e desacoplamento.



# 4.4 Segundo experimento

Um segundo ensaio foi realizado entre os dias 20 e 25 de junho, no mesmo local e ambiente de coleta. Entretanto, o segundo experimento contou com um número maior de indivíduos por amostra, sendo 4 amostras, detalhadas na Tabela 3.

Tabela 3: Amostras de mexilhões-dourados, segundo experimento.

Amostra nº	Quantidade de indivíduos	Tempo
4	60	20 min.
3	40	10 min.
2	104	40 min.
1	112	30 min.

O experimento foi realizado utilizando o mesmo modo operante do aparelho (40 KHz), porém houve alterações no tempo de exposição e no número de indivíduos das amostras. Outro diferencial foi o uso do substrato rochoso, o que não aconteceu no primeiro ensaio (mas sim no terceiro).

Na amostra nº 1, 112 indivíduos foram expostos a ondas ultrassônicas, pelo tempo de 30 minutos; a amostra nº 2 foi composta por 104 indivíduos e com exposição de 40 minutos; na amostra nº 3, 40 indivíduos foram expostos ao aparelho por 10 minutos; por fim, a amostra nº 4 contou com 60 indivíduos e tempo de exposição de 20 minutos.

A exposição das amostras conforme seus respectivos tempos aconteceu repetidamente em cada um dos 3 dias de experimento. Os resultados quantitativos foram observados e anotados nos respectivos dias de aplicação, o que difere dos outros dois experimentos, nos quais foram observados esses valores após 24 horas da exposição dos mexilhões ao aparelho.

### 4.5 Terceiro experimento

Em agosto foi realizada a terceira coleta, no mesmo local e ambiente das anteriores, e após a coleta, foi selecionado o mesmo número de indivíduos e amostras do primeiro ensaio, para que pudesse ser realizada a contraprova referente ao primeiro. Também houve a coleta de 7,5 litros de água do habitat natural e a adição de mais 7,5 litros de água clorada. O experimento iniciou já no dia da coleta e foi finalizado após quatro dias, em 12 de agosto. As amostras foram submetidas ao mesmo período de tempo das amostras do primeiro experimento. Entretanto, há alguns diferenciais: neste experimento, foram realizados dois ensaios, um com substrato rochoso e outro sem o substrato rochoso, sendo os indivíduos incrustados em plantas e raízes do habitat natural. Outro diferencial em relação ao primeiro experimento, é que neste os mexilhões foram submetidos ao processo diariamente, em cada um dos quatro dias de experimento. A Tabela 4 detalha as amostras utilizadas:

Tabela 4: Amostras de mexilhões-dourados, terceiro experimento.

Com Substrato Rochoso			Sem Substrato Rochoso		
Amostra nº	Nº indivíduos	Tempo	Amostra nº	Nº indivíduos	Tempo
5	12	31 min.	5	12	31 min.
4	9	21 min.	4	9	21 min.
3	12	13 min.	3	12	13 min.
2	13	7 min.	2	13	7 min.
1	15	3 min.	1	15	3 min.

# 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os critérios para a avaliação dos resultados foram, inicialmente, focados no levantamento das taxas de mortalidade por amostra que foram observadas um dia após o experimento. Também buscou-se observar outros fatores, como o processo de cavitação e desacoplamento (desincrustação).

#### 5.1 Primeiro experimento

No primeiro ensaio, realizado em abril de 2022, após o repouso dos mexilhões no aquário por 24 horas, iniciou-se o primeiro dia de observação e experimentos. Observou-se que não houve qualquer morte ou desincrustação após o repouso. Em seguida, realizou-se a aplicação do aparelho sonicador, respeitando os tempos e quantidades por amostras já especificados. Não houve mortes ou desacoplamento dos mexilhões-dourados nesse dia. Em cada aplicação notou-se o processo físico de cavitação provocado pelas ondas ultrassônicas, corroborando com os autores Pereira (2012), Dias et al. (2014) e Ronchi (2014).

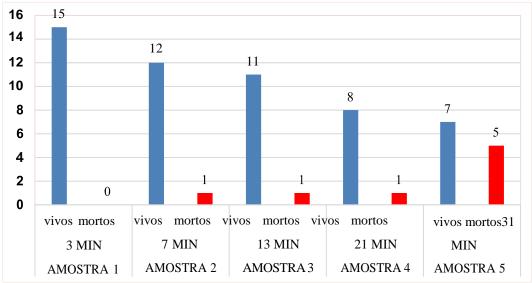


Gráfico 1: Mortalidade observada no primeiro experimento.

Na amostra 5, nos 31 minutos de experimentação, e na amostra nº 4, em 21 minutos, não houve desacoplamento. A temperatura da água subiu 4°C (22,5°C para 26,5°C). O aumento da temperatura é efeito comum, relatado por autores como Bassoli (2001) e Ronchi (2014). Na amostra nº 3, com 13 minutos; na amostra nº 2 e na amostra nº 1 não ocorreu desacoplamento nem aumento da temperatura da água. Após o experimento, as amostras foram devolvidas ao aquário por mais um dia, para observar possíveis efeitos nos indivíduos.

No terceiro dia, foram analisadas cada uma das amostras e foi possível notar, com base nas observações e nos números, que a aplicação do aparelho sonicador nos diferentes tempos não causou efeito considerável no desacoplamento, em função dos diferentes tempos aplicados, não havendo qualquer desacoplamento. A temperatura da água começou a aumentar a partir de 21 minutos de exposição.

Já a taxa de mortalidade modificou-se de acordo com a quantidade de tempo no qual as amostras foram submetidas: o maior tempo, 31 minutos, na amostra nº 5, teve a maior mortalidade: 5 mortos de um total de 12, com um resultado de 41,66%. Nos tempos menores, as taxas de mortes foram reduzindo-se até chegar em zero, no tempo de 3 minutos.

No primeiro experimento, observou-se uma diferença na taxa de mortalidade, ocorrendo mais mortes proporcionais conforme os maiores tempos. Vale ressaltar, entretanto, que em decorrência da falta de um N amostral maior, não foi possível realizar uma análise mais adequada dos resultados e, portanto, os próximos experimentos reforçarão com mais dados.

#### 5.2 Segundo experimento

A segunda leva de ensaios com o sonicador foi realizada conforme explicitado no item 4.4. O Gráfico 2 mostra os resultados alcançados com cada amostra nos quatro dias de experimento, considerando a quantidade de mexilhões-dourados vivos, mortos e desacoplados.

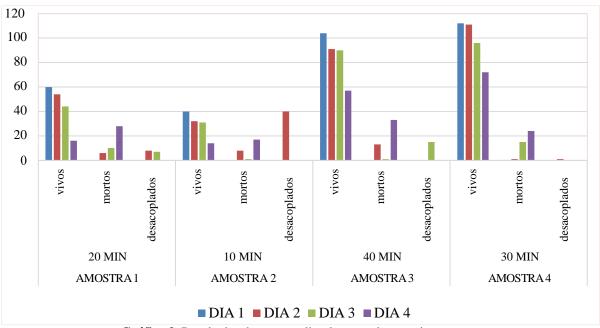


Gráfico 2: Resultados dos quatro dias do segundo experimento.

Neste experimento, os resultados chamam a atenção, inicialmente pelo tempo no qual as amostras foram submetidas. Nos dois menores tempos, foi observada a maior taxa de mortalidade, considerando a proporção entre total de mortos ao fim do experimento sobre o total de indivíduos que iniciaram o experimento. Ao fim do quarto dia de experimento, os óbitos ocorreram em 73,3% do total da amostra nº 1 (20 minutos), e 65% de total de mortes para a amostra nº 2 (10 minutos). Enquanto para os tempos maiores, a mortalidade proporcional para as amostras nº 3 (40 minutos) e nº 4 (30 minutos) foram menores, 45,19% e 35%, respectivamente. Vale frisar que nas amostras de tempos maiores, a quantidade de mexilhões dourados foi bem maior, o que possivelmente pode influenciar nas razões obtidas. Em relação ao desacoplamento, os resultados variam bastante, sendo que na amostra nº 2 houve o desacoplamento de 100% dos indivíduos, somente no segundo dia de ensaio. As amostras nº 1 e nº 3 apresentaram desacoplamento total de 15 indivíduos cada, enquanto a amostra nº 4 apresentou somente 1 desacoplamento.

#### 5.3 Terceiro experimento

Por fim, a terceira leva de amostras foi realizada com os mesmos tempos de exposição em minutos por ensaio e quantidade de indivíduos das amostras da primeira leva, sendo um experimento com substrato e outro sem o substrato.

#### 5.3.1 Com substrato

O experimento, que inicialmente aconteceria em quatro dias, acabou sendo finalizado no terceiro dia, por conta da ocorrência de 100% de mortalidade em todas as amostras. A Tabela 5 apresenta os resultados quantitativos das amostras com substrato, sendo contabilizadas as observações dos indivíduos por amostra, tanto durante, quanto depois do experimento. Este experimento ficou em observação por 24 horas depois de sua realização.

**Tabela 5**: Resultados do terceiro experimento, com substrato rochoso.

	Al	MOSTRA 1 IN   N = 1:		•	AMOSTRA 7 MIN   N =	. 2
	Vivos	Mortos	Desacoplados	Vivos	Mortos	Desacoplados
DIA 1	7	8	0	11	2	0
DIA 2	2	5	1	1	10	2
DIA 3	0	2	0	0	1	0
DIA 4	-	-	-	-	-	-
TOTAL	0	15	1	0	13	2

		MOSTRA 3 IIN   N = 1			AMOSTRA 21 MIN   N =	
	Vivos	Mortos	Desacoplados	Vivos	Mortos	Desacoplados
DIA 1	5	7	0	5	4	5
DIA 2	1	4	1	0	5	0
DIA 3	0	1	1	-	-	-
DIA 4	-	-	-	-	-	-
TOTAL	0	12	2	0	9	5

AMOSTRA 5 31 MIN   N = 12					
	Vivos	Mortos	Desacoplados		
DIA 1	4	8	1		
DIA 2	1	3	0		
DIA 3	0	1	1		
DIA 4	-	-	-		
TOTAL	0	12	2		

Na amostra nº 1, 15 indivíduos foram submetidos a 3 minutos no aparelho sonicador. Como resultados para o primeiro dia tem-se a taxa de mortalidade de 53,33% (razão entre quantidade de mortos e N), e para o segundo dia, mortalidade de 75%. Desacoplou 1 indivíduo (8,33%). Ao fim do terceiro dia de experimento, o último indivíduo da amostra foi a óbito.

Na amostra nº 2, com 7 minutos de ensaio e N = 13, no primeiro dia a mortalidade foi baixa

(15,4%), e no segundo dia morreram quase todos os indivíduos, restando somente um, e atingindo 90,9% de mortalidade. No terceiro dia este último indivíduo morreu. Foram observados 2 desacoplamentos (15,8%).

Para a amostra nº 3, com tempo de 13 minutos no aparelho, foi observada uma maior taxa de mortalidade no primeiro dia, em relação às amostras anteriores, ultrapassando a metade (58,3%). No segundo dia a mortalidade também foi alta (80%), restando somente um indivíduo vivo que morreu no dia seguinte.

A amostra nº 4, com tempo de 21 minutos, no primeiro dia apresentou a taxa de mortalidade de 44,4%, restando 5 indivíduos que vieram a óbito já no segundo dia, atingindo 100% de mortalidade em dois dias de experimento. Desacoplaram 2 indivíduos no total.

Por fim, na amostra nº 5, com o tempo de 31 minutos tem-se a maior mortalidade, sendo 66,7% no primeiro dia, e 75% no segundo. O último indivíduo morreu no terceiro dia. Houveram 2 desacoplamentos.

Observa-se a facilidade com a qual os mexilhões morrem. Também é perceptível que, no maior tempo, a taxa de mortalidade é maior.

#### 5.3.2 Sem substrato

A seguir, são apresentados os dados quantitativos referentes ao experimento realizado sem o substrato, sendo os mexilhões expostos ao aparelho acoplados em plantas e raízes do habitat natural. O Gráfico 3 permite uma visualização ampla dos resutlados observados em cada um dos dias:

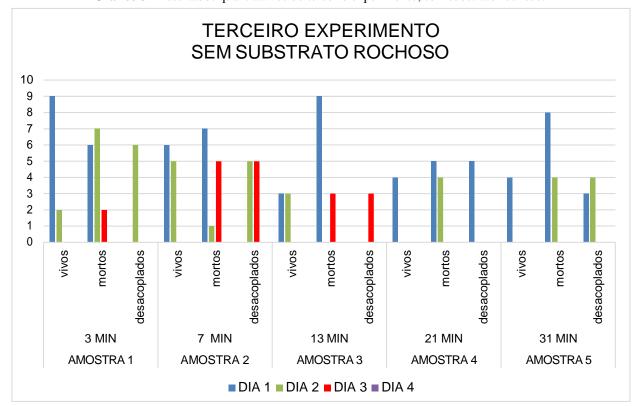


Gráfico 3 - Resultados quantitativos do terceiro experimento, sem substrato rochoso.

Os resultados comparados com substrato e sem substrato rochoso, não variam muito, com exceção de algumas discrepâncias eventuais, como no caso da amostra de nº 2: com substrato, houve grande morte em seu segundo dia de experimento (90,9%), enquanto sem substrato atingiu um número pequeno, de 16,6%. Outra diferença notável acontece na amostra 3º, tendo o ensaio sem substrato rochoso maior mortalidade no primeiro dia (diferença de 16,7%), além de não haver morte no ensaio sem substrato no segundo dia. Em relação ao desacoplamento, este acontece com mais facilidade quando o substrato são raízes e plantas aquáticas (31 desacoplamentos no total) do que quando utilizado o substrato rochoso (12 desacoplamentos). Essa diferença pode acontecer devido ao material no qual o mexilhão-dourado está incrustado.

No geral, é perceptível que, quanto mais tempo expostos às ondas ultrassônicas, além da taxa de mortalidade ser maior, os mexilhões chegam a óbito mais rapidamente.

# 6 CONCLUSÕES

Apesar de trazer diversas consequências às indústrias com sistemas já infestados pelo *L. fortunei*, diante das pesquisas desenvolvidas nos últimos anos, este problema pode ser solucionado, uma vez que muitos métodos têm se tornado eficientes no combate ao mexilhão, como o uso do aparelho sonicador.

Este estudo foi capaz de comprovar a eficácia do ultrassom para o desacoplamento e a morte dos mexilhões-dourados, o que possibilita seu controle a partir desse tratamento físico. Portanto, este estudo torna-se de extrema relevância, sobretudo, diante da necessidade da diminuição dos impactos econômicos e ambientais causados pelo mexilhão-dourado que, como mencionado nesta pesquisa, podem abranger desde a obstrução de bombas em usinas hidrelétricas até impactos na qualidade da água e de biomas, dentre outros problemas.

Por fim, é cabível a realização de futuras pesquisas que explorem outros parâmetros para os experimentos, como a utilização de outros aparelhos de banho de ultrassom, e também diferentes tempos de exposição. Outras delimitações que também podem vir a contribuir com essa linha de pesquisa podem abordar como as ondas ultrassônicas podem ser utilizadas *in loco*, de forma a estabelecer um método de controle no local onde as incrustações geram danos para empresas e outros ambientes que necessitam do controle, podendo então trazer avanços para as soluções de controle do mexilhão-dourado através das ondas ultrassônicas.

# REFERÊNCIAS

ADELINO, José et al. The economic costs of biological invasions in Brazil: a first assessment. **NeoBiota**, v. 67, p. 349-374, 2021.

ALMEIDA, Manuela G.; SILVA, Sandra M. **Acústica**. Portugal: Universidade do Minho – Escola de Engenharia, 2005.

AVELAR, W. E. P.; MARTIM, S. L.; VIANNA, M. P. A new occurrence of Limnoperna fortunei (Dunker 1856) (Bivalvia, Mytilidae) in the state of São Paulo, Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 64, p. 739-742, 2004.

BASSOLI, Dyjalma Antônio. **Avaliação dos efeitos do ultra-som pulsado de baixa** intensidade na regeneração de músculos esqueléticos com vistas à aplicabilidade em clínica fisioterapêutica. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos/Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto/Instituto de Química de São Paulo - Universidade de São Paulo, 2001.

BATISTA, William Romão. Água de Lastro-problema e soluções. **Revista Marítima Brasileira**, v. 138, n. 01/03, p. 174-174, 2018.

BERGMANN, C. P. et al. Seleção de materiais e revestimentos para o controle de incrustações do mexilhão dourado na Usina Hidrelétrica de Ibitinga (SP, Brasil). **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 15, p. 21-30, 2010.

BESEN, Mateus Antonio; MARENGONI, Nilton Garcia. Incrustação de mexilhão- dourado (Limnoperna fortunei) nas telas de tanques-rede. **Acta Iguazu**, v. 8, n. 5, p. 60-68, 2019.

BISCEGLI, Clovis Isberto. **Conceitos da Física do Ultra-som**. Embrapa Instrumentação-Documentos (INFOTECA-E), 2003.

BLUME, K. et al. Dosimetria proposta para o tratamento por ultra-som – uma revisão de literatura. **Fisioterapia em Movimento (Physical Therapy in Movement)**, v. 18, n. 3, 2017.

BOCCATO, V. R. C. Metodologia da pesquisa bibliográfica na área odontológica e o artigo científico como forma de comunicação. **Revista de Odontologia da Universidade Cidade de São Paulo**, São Paulo, v. 18, n. 3, p. 265-274, 2006.

BOLTOVSKY, D.; CATALDO, D. Population dynamics of Limnoperna fortunei na invase fouling mollusk in the lower Paraná River \*Argentina. Biofouling, v. 14, p. 255-263, 1999.

CAMARGO, Paulo Ricardo da Silva et al. Toxicidade do glifosato em *Phisa acuta* Drapramurd, 1805, em condições não controladas de laboratório, **Revista Interação**, Curitiba, v. 21, n. 1, p. 581-590, 2021a.

CAMARGO, Paulo Ricardo da Silva et al. Pode o mexilhão dourado reproduzir em laboratório?. **Conjecturas**, v. 21, n. 7, p. 614-629, 2021b.

CARDOSO, T.; ALARCÃO, I. & CELORICO, J. **Revisão da literatura e sistematização do conhecimento**. Porto: Porto Editora. 2010.

CASTRO, Ítalo B.; WESTPHAL, Eliete; FILLMANN, Gilberto. Tintas anti-incrustantes de terceira geração: novos biocidas no ambiente aquático. **Química Nova**, v. 34, p. 1021-1031, 2011.

CORDEIRO, Nelmara IS et al. Effect of starvation and subsequent feeding on glycogen concentration, behavior and mortality in the golden mussel Limnoperna fortunei (Dunker, 1857) (Bivalvia: Mytilidae). **Journal of Limnology**, v. 75, n. 3, p. 618-625, 2016.

COSTA, Juliana Mara et al. Incrustação de mexilhão dourado Limnoperna fortunei em tanques-rede. **Revista Cultivando o Saber**, v. 5, n. 2, p. 37-46, 2012.

COVO, Carlos Cesar de Carvalho. **Modelagem Matemática e Computacional de Efeitos em Ondas Sonoras**. Departamento de Matemática da Universidade Federal do Paraná, 2016.

CTG BRASIL. **CONTROLE DA INFESTAÇÃO por mexilhão dourado por indução genética da infertilidade – Fase 2**. 2019. Disponível em:

<a href="https://www.ctgbr.com.br/ped2019/andamento.html">https://www.ctgbr.com.br/ped2019/andamento.html</a>. Acesso em: 18 mar. 2022.

CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais. **O mexilhão Dourado, uma ameaça às águas e hidrelétricas brasileiras.** Belo Horizonte, Ed. CEMIG, p. 24, 2004.

DADAM, Allan Pedro. **Analisador de Frequência e Espectro Sonoro para Alinhamento de Sistemas de Áudio**. Trabalho de Conclusão de Curso - Instituto Federal de Santa Catarina. Campus Joinville. Graduação. Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, Joinville, 2019.

DARRIGRAN, Gustavo; DAMBORENEA, Cristina. Ecosystem engineering impact of Limnoperna fortunei in South America. **Zoological science**, v. 28, n. 1, p. 1-7, 2011.

DARRIGRAN, G. 1995. Limnoperna fortunei: un problema para los sistemas naturales de agua dulce del mercosur? **Revista del museo**, n. 5, p. 85–87, 1995.

DIAS, A. L. B. et al. Extração de Pimenta Malagueta (Capsicum Frutescens L.) a Baixa Pressão Assistida por Ultrassom. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 2, p. 4752-4759, 2015.

DINIZ, D.M.A. Verificação da influência do mexilhão dourado nas grades de tomadas d'água. **Universidade Federal de Minas Gerais**, Programa de pós-graduação em saneamento e recursos hídricos. Belo Horizonte. 2010.

EL HAJ, Yasmin; BOHN, Sofia; SOUZA, Marta Marques. Tolerance of native and invasive bivalves under herbicide and metal contamination: an ex vivo approach. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 30, p. 31198- 31206, 2019.

FARIA, Estael Araújo de et al. Estudo das características antiincrustantes de materiais. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 59, p. 233-238, 2006.

FREIRE, Cassio Geremia; MARAFON, Andrea Tozzo. Espécies de moluscos invasores nos ecossistemas aquáticos brasileiros e seu impacto no meio ambiente. **InterfacEHS**, v. 13, n. 1, 2018.

GATTÁS, Florencia et al. Invasive species versus pollutants: potential of Limnoperna fortunei to degrade glyphosate-based commercial formulations. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 201, p. 110794, 2020.

GIGLIO, Matías L. et al. Reproductive pattern of the aggressive invader Limnoperna fortunei (Bivalvia, Mytilidae) in South America. **Invertebrate Reproduction & Development**, v. 60, n. 3, p. 175-184, 2016.

GIL, Antonio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. São Paulo: Atlas, 1991.

GRANDO, Adriana et al. Associação de sulfato de ferro e ultrassom na clarificação de efluente de indústria láctea. **Engevista**, v. 18, n. 1, p. 189-206, 2016.

GUIMARAES, Claudia. **Efeito do ultrassom no comportamento natatório de larvas meroplanctônicas em fase de assentamento**. Dissertação (Mestrado em . Ciências) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

HALLIDAY D.; RESNICK R.; WALKER J. **Fundamentos da Física 2:** Gravitação, Ondas, Termodinâmica. São Paulo: Ltc, 2012, v. 2. 8<sup>a</sup> ed.

HAUBROCK, Phillip J. et al. Economic costs of invasive bivalves in freshwater ecosystems. **Diversity and Distributions**, v. 28, n. 5, p. 1010-1021, 2022.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Instrução Normativa nº 17, de 21 de outubro de 2015**. Diário Oficial da União, seção 1, p. 126. Brasília, DF, 2015.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Plano nacional de prevenção, controle e monitoramento do mexilhão-dourado (Limoneperna fortunei) no Brasil. Diretoria de Uso Sustentável da Biodiversidade e Florestas. — Brasília, DF: IBAMA, 2020.

IWASAKI, Keiji. Behavior and taxis of young and adult Limnoperna fortunei. In: **Limnoperna fortunei**. Springer, Cham, 2015. p. 249-260.

JUNIOR, Carlos Roberto Staub. **Uma sequência didática envolvendo os conceitos básicos de ondas mecânicas utilizando os métodos** *Just-in-time Teaching* e *Peer Instruction* **na perspectiva da teoria da aprendizagem significativa e da teoria sociointerativista.** 253 f. 2019. Dissertação (Mestrado em Física) — Universidade Federal do Rio Grade do Sul, Tramandaí, 2019.

KARATAYEV, Alexander Y. et al. The invasive bivalves Dreissena polymorpha and Limnoperna fortunei: parallels, contrasts, potential spread and invasion impacts. **Journal of Shellfish Research**, v. 26, n. 1, p. 205-213, 2007.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de Metodologia Científica**. São Paulo, SP: Atlas 2003.

LANDELL, Melissa Fontes; BROETTO, Leonardo. Biodiversidade de microorganismos eucariontes. In: THOMPSON, Fabiano; THOMPSON, Cristiane (org.) **Biotecnologia Marinha**. Rio Grande: FURG, 2020.

LOPES, A. D. A et al. **Avaliação de sobrevivência de organismos transportados por água de lastro de navios mercantes**. Arraial do Cabo: Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira Departamento de Oceanografia, cap. 1, p.1-11, 2010.

MACEDO, N. D. **Iniciação à pesquisa bibliográfica**: guia do estudante para a fundamentação do trabalho de pesquisa. São Paulo, SP: Edições Loyola,1994.

MANSUR, M. C. D. et al. Primeiros dados quali-quantitativos do mexilhão dourado, Limnoperna fortunei (Dunker), no delta do jacuí, no lago guaíba e na laguna dos patos, Rio Grande do Sul, Brasil e alguns aspectos de sua invasão no novo ambiente. **Revista Brasileira de Zoologia**, nº 20. p. 75-84, 2003.

MARENZI, Adriano WC; WESTPHAL, Gisela GC. Cultivo de organismos aquáticos-Malacocultura. Instituto Federal Paraná. 2016.

MEDEIROS, Raphael Corrêa; Lazarotto, Joseane Sarmento; VOLPATTO, Fernanda. Desinfecção de esgoto sanitário proveniente de tanque séptico com uso do ultrassom. In: Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente XXIX, São Paulo, 2019.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONABIO nº 5 de 21 de outubro de 2009**. Secretaria de Biodiversidade e Florestas – Comissão Nacional de Biodiversidade. Brasília/DF, 2009.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE; IBAMA. Diagnóstico sobre a invasão do mexilhão-dourado (Limnoperna Fortunei) no Brasil. 2017.

MORAIS, D. et al. Ondas ultrassônicas: teoria e aplicações industriais em ensaios nãodestrutivos. **Revista brasileira de física tecnológica aplicada**, v. 4, n. 1, p. 16-33, 2017.

PAOLUCCI, Esteban M. et al. Veligers of the invasive bivalve Limnoperna fortunei in the diet of indigenous fish larvae in a eutrophic subtropical reservoir. **Austral Ecology**, v. 42, n. 7, p. 759-771, 2017.

PAULA, Rayan Silva et al. A Case for the Continued Study of the Golden Mussel Invasion of

Brazil: Efficient Detection and Containment of Limnoperna fortunei (Dunker, 1857) Dispersion Involves Multiple Approaches and Different Actors.

**Oceanogr Fish Open Access**, v. 13, n. 4, p. 1-4, 2021.

PEREIRA, N. N. Alternativas de tratamento da água de lastro em portos exportadores de minério de ferro. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2012.

PEREIRA, S. M.; COLARES, E. P.; VIEIRA, J. P. How far can the Golden mussel (Limnoperna fortunei–Mytilidae) go with its own foot. **International Journal of Zoology and Animal Biology**, v. 2, n. 5, p. 1-8, 2019.

POLACHINI, Dyjalma Antônio. **Determinação das melhores condições de hidrólise física com ultrassom de potência em resíduos de amendoim**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) - Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", São José do Rio Preto, 2015.

RIBOLLI, Josiane et al. Optimized and validated protocol to the detection of the invasive bivalve Limnoperna fortunei from eDNA plankton samples. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 33, 2021.

ROCHA, A. C. M; MAINIER, F. B.; ALVES, C. H. F. Processo de Remoção de Contaminantes Industriais por Ultrassom. **In: VIII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia**. Resende/RJ, 2011.

RONCHI, Renata Peterle; SÃO MATEUS, E. S. Avaliação da eficiência do ultrassom no processo de separação de fases em água produzida e em emulsões sintéticas do tipo O/A. Dissertação (Mestrado em Energia) — Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo, São Mateus, 2014.

ROSA, Daniel de Melo; ASSIS, Paulo Santos. Limnoperna Fortunei no Brasil: Histórico de Dispersão, Biologia Populacional, Impactos e Controle. In: HAYASHI, Carmino; SARDINHA, Diego de Souza; PAMPLIN, Paulo Augusto Zaitune (Org). **Ciências Ambientais**: Recursos Hídricos. 1. ed., p. 219-235, Ribeirão Preto, SP: Carmino Hayashi, 2020.

SANTOS, Cíntia P. WÜRDIG, Norma L. MANSUR, Maria. C. D. Fases Larvais do mexilhão dourado *Limnoperna fortunei* na bacia do Guaíba, rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Zoologia**, v.22, n.3, p. 702-708, 2005.

SANTOS, Sonia Barbosa et al. Espécies de moluscos límnicos invasores no Brasil. **Moluscos límnicos invasores no Brasil: biologia, prevenção e controle**, p. 25-49, 2012.

SARDIÑA, P; CATALDO DH, BOLTOVSKY, D. The effects of the invasive mussel, Limnoperna fortunei, on associated fauna in South American freshwaters: Importance of physical structure and food supply. **Fundamental e Apply Limnology**, no 173, p. 135-144, 2008.

SILVA, Amanda Guilherme. **Vivendo com o inimigo: competição entre os corais invasores Tubastraea spp. e a esponja Desmapsamma anchorata na Baía de Ilha Grande, RJ**. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Evolução) — Instituto de Biologia Roberto Alcantara Gomes, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SILVA, Fabiano A. et al. Mexilhão-dourado no Brasil: detecção de um perigoso invasor. **Ciência Hoje**, v. 57, 2016.

SILVA, Ivana et al. Fish vs. Aliens: predatory fish regulate populations of Limnoperna fortunei mitigating impacts on native macroinvertebrate communities. **Hydrobiologia**, v. 848, n. 9, p. 2281-2301, 2021.

SILVA, Samara Hermes et al. Limnoperna fortunei - Updating the geographic distribution in the Brazilian watersheds and mapping the regional occurrence in the Upper Uruguay River basin. **Biota Neotropica**, v. 21, 2021.

SIMAS, Sunshine de Ávila. **Interações e recursos alimentares para a comunidade de peixes: a invasão do mexilhão-dourado no alto rio Uruguai**. Tese (Doutorado em Aquicultura) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

TEZOTO, T. M. **Princípios Físicos de Ultrassonografia**. Santa Casa da Misericórdia. Serviço de Ultrassonografia. São Paulo, 2015. Disponível em: <a href="https://slideplayer.com.br/amp/6133339/">https://slideplayer.com.br/amp/6133339/</a>>. Acesso em: 10 mar. 2022.

TOMITÃO, Isabela de Macedo. **Síntese rápida para obtenção de óxido de estanho utilizando agitação mecânica associada a sonoquímica**. Dissertação (Mestrado em Química) — Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2014.

VARELA, Leciani Eufrásio Coelho; COSTA, Samuel; OLIVEIRA, Humberto Luz. A física da audição presente nos livros didáticos de ciências do 80 ano do ensino fundamental. **Caderno de física da UEFS**, v.15, n. 2, p. 1-15, 2017.

XIA, Zhiqiang et al. Golden mussel (Limnoperna fortunei) survival during winter at the northern invasion front implies a potential high-latitude distribution. **Diversity and Distributions**, v. 27, n. 8, p. 1422-1434, 2021.

ZOTTI, Naiara Cristina. **Secagem de Varronia curassavica, Lippia origanoides e Ocimum gratissimum com bomba de calor utilizando banho de ultrassom como pré-tratamento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.