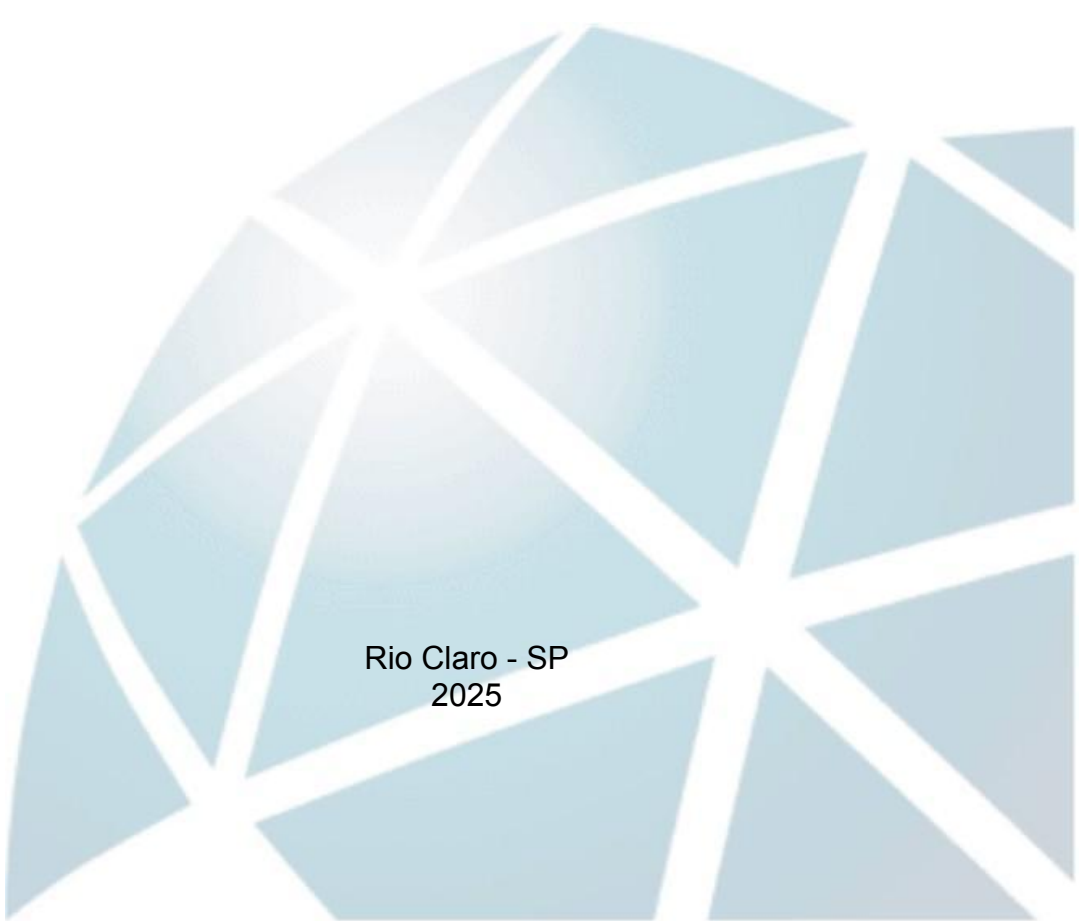

Ciências Biológicas

Thainara Karini Gonçalves

**Utilização do pinguim-de-magalhães
(*Spheniscus magellanicus*) como bioindicador de
elementos traço na costa sul-brasileira**



Rio Claro - SP
2025

Thainara Karini Gonçalves

**Utilização do pinguim-de-magalhães (*Spheniscus magellanicus*)
como bioindicador de elementos traço na costa sul-brasileira**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Biociências – Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita
Filho”, para obtenção do grau de Licenciada e
Bacharela em Ciências Biológicas

Orientador(a): Prof. Dr. Amauri Antonio Menegário

Coorientador(a): Me. Guilherme dos Santos Lima

Rio Claro - SP
2025

G635u Gonçalves, Thainara Karini

Utilização do pinguim-de-magalhães (*Spheniscus magellanicus*) como bioindicador de elementos traço na costa sul-brasileira / Thainara Karini Gonçalves. -- Rio Claro, 2025

40 p. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Ciências Biológicas) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Biociências, Rio Claro

Orientador: Amauri Antonio Menegário

Coorientador: Guilherme dos Santos Lima

1. Aves marinhas. 2. Metais. 3. Bioacumulação. 4. Sentinela ambiental. 5. Bacia de Santos. I. Título.

Thainara Karini Gonçalves

**Utilização do pinguim-de-magalhães (*Spheniscus magellanicus*)
como bioindicador de elementos traço na costa sul-brasileira**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Biociências, Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita
Filho”, para obtenção do grau de Licenciada e
Bacharela em Ciências Biológicas.

BANCA EXAMINADORA:

Me. Guilherme dos Santos Lima

Dra. Aline Dal Olio Gomes

Dra. Melina Borges Teixeira Zanatta

Aprovado em: 06 de junho de 2025

Assinatura do discente
Thainara Karini Gonçalves

Assinatura do(a) orientador(a)
Amauri Antonio Menegário

Assinatura do coorientador
Guilherme dos Santos Lima

A minha família, que me deu de tudo para que fosse possível a conquista do meu diploma, e que são tudo que eu tenho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, pois sem eles, essa jornada não seria possível.

Agradeço a minha mãe, que por vezes me ensinou que era necessário paciência para alcançar meus objetivos. Agradeço ao meu pai, que me ensinou a ir atrás dos meus sonhos. Agradeço a minha irmã, primeira pessoa da minha família a se formar em uma faculdade pública de renome, bióloga de formação, que me ensinou a amar a natureza e os animais, e principalmente a ter foco nos estudos. Agradeço ao meu companheiro nessa vida, que por vezes me ensinou a ter um objetivo e lutar por ele.

A minha amiga Maria Eduarda, que dividiu o quarto e a vida comigo, que partilhou de angústias, lágrimas, sorrisos e gargalhadas, por esses longos anos de faculdade e que me ensinou que quem tem amigos, tem tudo.

Aos meus amigos de curso e de faculdade, que me ensinaram a ter uma família e um lar, mesmo longe de casa.

Agradeço ao Prof. Dr. Amauri, que abriu as portas do seu laboratório para meu primeiro estágio, possibilitando também a execução desse trabalho. Agradeço ao Guilherme, meu co-orientador que me instruiu e aconselhou nesses anos.

Agradeço a todos do CEA e do GEMB, que fizeram meus dias mais leves e me edificaram com seus vastos conhecimentos. Agradeço a todos aqueles que se fizeram presentes nos momentos bons e ruins, nas horas de estudo e de diversão, pois sem vocês, nada disso seria possível.

RESUMO

O presente estudo avaliou a acumulação e distribuição de elementos traço em pinguins-de-Magalhães (*Spheniscus magellanicus*) na Bacia de Santos, considerando variações em função do sexo, idade e ano de coleta dos indivíduos. A pesquisa buscou compreender os potenciais impactos das atividades antropogênicas nos ecossistemas marinhos, utilizando o pinguim-de-Magalhães como bioindicador devido à sua posição de nível trófico elevado. Foram analisadas 1238 amostras de tecido hepático coletadas entre os anos de 2016 e 2023 pelo Projeto de Monitoramento de Praias da Bacia de Santos (PMP-BS). As concentrações de elementos essenciais (Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, V e Zn) e não essenciais (As, Cd, Pb, Ba) foram determinados por Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS), enquanto o mercúrio (Hg) foi analisado por Espectrometria de Absorção Atômica com Geração de Vapor Frio (CV-AFS). Os resultados demonstraram diferenças significativas na bioacumulação dos elementos traço entre machos e fêmeas, de forma que elementos como arsênio (As), cádmio (Cd), cobre (Cu), manganês (Mn), zinco (Zn), vanádio (V) e mercúrio (Hg) estavam em maior concentração nos machos. Em contrapartida, cromo (Cr), chumbo (Pb), molibdênio (Mo), bário (Ba) e níquel (Ni) não apresentaram variação significativa entre os sexos. Em relação a idade dos indivíduos, apenas o molibdênio (Mo) indicou diferença significativa, enquanto os demais elementos não apresentaram variação relevante entre os grupos de idade. Já as análises temporais mostraram variações significativas nas concentrações da maioria dos elementos ao longo dos anos. De maneira geral, este estudo evidenciou que a bioacumulação de elementos traço no pinguim-de-Magalhães se deve a uma complexa interação de fatores fisiológicos, ambientais e ecológicos, e que o uso do pinguim como bioindicador é uma ferramenta valiosa para avaliar a saúde dos ecossistemas marinhos, fornecendo subsídios para estratégias de conservação e redução de impactos das ações antrópicas.

Palavras-chave: Aves marinhas; Metais; Bioacumulação; Sentinela ambiental; Bacia de Santos.

ABSTRACT

This study evaluated the levels of trace elements in Magellanic penguins (*Spheniscus magellanicus*) in the Santos Basin, considering variations according to sex, age, and year of collection. The research sought to understand the impacts of anthropogenic activities on marine ecosystems, using the Magellanic penguin as a bioindicator due to its high trophic level position. A total of 1.238 liver tissue samples collected between 2016 and 2023 by the Santos Basin Beach Monitoring Project (PMP-BS) were analyzed. Concentrations of essential (Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, V, and Zn) and non-essential (As, Cd, Pb, Ba, and Hg) elements were determined using Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) and Cold Vapor Atomic Absorption Spectrometry (CV-AFS). The results revealed significant differences in trace element bioaccumulation between males and females. Elements such as arsenic (As), cadmium (Cd), copper (Cu), manganese (Mn), zinc (Zn), vanadium (V), and mercury (Hg) were found in higher concentrations in males. In contrast, chromium (Cr), lead (Pb), molybdenum (Mo), barium (Ba), and nickel (Ni) showed no significant variation between sexes. Regarding age, only Mo exhibited significant differences, while the other elements showed no relevant variation among age groups. Temporal analyses indicated significant fluctuations in the concentrations of most elements over the years. Overall, this study demonstrated that trace element bioaccumulation in Magellanic penguins results from a complex interaction of physiological, environmental, and ecological factors. The use of penguins as bioindicators proved to be a valuable tool for assessing marine ecosystem health, providing critical insights for conservation strategies and mitigating anthropogenic impacts.

Keywords: Seabirds; metals; bioaccumulation; environmental sentinel; Santos Basin.

Title in english: Use of the Magellanic penguin (*Spheniscus magellanicus*) as a bioindicator of trace elements on the southern Brazilian coast.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	08
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1	Bacia de Santos.....	12
2.2	PMP-BS.....	13
2.3	Bioacumulação, Biomagnificação e Bioconcentração.....	14
2.4	Estudo de elementos traço no pinguim-de-magalhães.....	15
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
3.1	Sistematização dos dados.....	19
3.2	Materiais e Equipamentos.....	20
3.3	Soluções e Reagentes.....	20
3.4	Pré-tratamento e armazenamento de amostras.....	20
3.5	Liofilização.....	21
3.6	Digestão para determinação de elementos traço.....	21
3.7	Determinações: ICP-MS.....	21
3.8	Determinações: CV-AFS.....	21
3.9	Tratamento estatístico.....	22
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
4.1	Diferença nos níveis de elementos traço por sexo.....	25
4.2	Influência da idade na concentração de elementos traço.....	27
4.3	Variação temporal na contaminação por elementos traço.....	29
5	CONCLUSÃO.....	32
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33

1. INTRODUÇÃO

As atividades antropogênicas têm desempenhado um papel crucial na transformação dos ecossistemas naturais, com impactos significativos na qualidade ambiental (Santos *et al.*, 2024). A industrialização, a urbanização e a agricultura intensiva, entre outras atividades humanas, são responsáveis pela liberação de diversos contaminantes no ambiente (Pascalichio, 2000; Souza *et al.*, 2018; Lima *et al.*, 2022b). Entre esses, destacam-se os elementos traço, devido ao seu elevado potencial de bioacumulação e toxicidade, que podem causar danos tanto ao meio ambiente quanto aos organismos vivos presentes nele (Lima *et al.*, 2024).

O uso dos elementos traço vêm crescendo nos últimos anos para suprir a demanda na produção de dispositivos tecnológicos, assim como celulares, veículos elétricos e dispositivos médicos, dessa forma, a disponibilidade desses elementos por meio da contaminação no meio ambiente cresce de maneira diretamente proporcional ao seu uso industrial, atingindo diversos ecossistemas e espécies (Celis *et al.*, 2025).

Embora a presença dos elementos traço seja geralmente associado a regiões próximas às suas fontes de liberação direta, como áreas sujeitas a intemperismos, erupções vulcânicas ou atividades antropogênicas (Pascalichio, 2000; González-Fernández *et al.*, 2011; Lima *et al.*, 2022b), esses elementos possuem capacidade de se dispersar por meio de correntes atmosféricas e oceânicas, permitindo que sejam encontrados até mesmo em locais remotos (Sousa *et al.*, 2023). As correntes oceânicas, por exemplo, atuam como vetores que transportam contaminantes ao longo do oceano, dificultando sua remoção (Sousa *et al.*, 2023). Além disso, os íons metálicos presentes no material particulado atmosférico podem se acumular em solos, corpos d'água e vegetação, contaminando plantas, animais e, conseqüentemente, os seres humanos (Rosa, 2024).

A Bacia de Santos é uma bacia de margem continental passiva, sendo a detentora de recursos petrolíferos em águas profundas mais abundantes do mundo (Zuo *et al.*, 2023). Além disso, é responsável por desempenhar um importante papel para os ecossistemas marinhos e no ciclo do carbono no Oceano Atlântico Sudoeste (Kampel *et al.*, 2023). A Bacia de Santos banha os estados de Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e Santa Catarina, e é considerada a maior bacia sedimentar brasileira (Araújo, 2007; Kampel *et al.*, 2023). Devido ao potencial exploratório associado à descoberta do pré-sal, a exploração, produção e o transporte do petróleo têm se

intensificado, aumentando, conseqüentemente, o risco de potenciais derramamentos dessa substância nas regiões marinhas e costeiras (Romero *et al.*, 2011).

No contexto de vida local, a Bacia de Santos apresenta uma grande riqueza em biodiversidade (Petrobras, 2022), e dentre as espécies que frequentam essa região, podemos destacar o pinguim-de-magalhães (*Spheniscus magellanicus*), que, assim como outras espécies do gênero, são vistos como animais carismáticos devido sua representação em filmes e mídias, despertando assim o interesse da população local e de turistas (Villanueva, 2012). Os pinguins se diferenciam dos demais grupos de aves por apresentar um corpo fusiforme, com asas atrofiadas que atuam como nadadeiras, além disso, possuem penas impermeáveis e cauda curta (Silveira, 2010).

No Brasil, o pinguim-de-Magalhães (*Spheniscus magellanicus*) é a espécie de pinguim mais abundante, sendo uma ave migratória de topo de cadeia, com alta especialização para mergulho e nado, podendo atuar como sentinela do ambiente marinho dado a sua vulnerabilidade em relação às mudanças ambientais ao ecossistema que pertencem (Branco, 2014; Kehrig *et al.*, 2015; Brusius *et al.*, 2021).

Os indivíduos adultos chegam a pesar 4,5 kg e medem cerca de 65 cm. Durante suas migrações quando saem das colônias da Patagônia em direção ao oceano Atlântico, chegando à Argentina, Uruguai e sul do Brasil (Dantas, 2018), não se afastam da costa, permanecendo próximos a plataforma continental, onde há abundância de peixes pelágicos, cefalópodes e outros organismos aquáticos que compõem sua dieta. Entretanto, no inverno, ao passar pela costa brasileira, o pinguim-de-Magalhães pode adicionar anchovas em sua dieta, evidenciando uma flexibilidade em sua busca por recursos (Silveira, 2010; Kehrig *et al.*, 2015; Scioscia *et al.*, 2014).

Os pinguins-de-Magalhães apresentam uma população reprodutora estimada entre 1,1 e 1,6 milhões de pares, distribuída principalmente ao longo da costa argentina nas Ilhas Falkland (Malvinas) e no Chile (Vega, 2010; Pon, 2023). Apesar de uma tendência de crescimento observada até a década de 1980, houve um registro de declínio em diversas colônias reprodutivas nas décadas seguintes (Pütz *et al.*, 2007). Atualmente, a União Internacional para a Conservação da Natureza (IUCN) classifica a espécie como "Quase Ameaçada", com dados indicando estabilidade populacional ou um decréscimo lento inferior a 10% ao longo de três gerações. As principais ameaças à sua conservação incluem poluição marinha,

degradação do habitat, mudanças climáticas, doenças e pesca accidental (Galo, 2019; IUCN, 2020). Nesse contexto, devido à sua posição na cadeia alimentar, os pinguins podem ser utilizados como biomonitores de contaminação pelos projetos de monitoramento de ecossistemas marinhos (Silveira, 2010).

Dentre os elementos cujo monitoramento é importante para avaliar as condições ambientais e o impacto de atividades antropogênicas no ecossistema estão os elementos essenciais e não essenciais. Diversos elementos traço, assim como o zinco (Zn), o cobre (Cu) e o ferro (Fe), são utilizados para a estabilização das estruturas de proteínas dos seres vivos, para facilitar as reações de transferência de elétrons e na catalisação das reações enzimáticas. Sendo assim, esses metais são elementos essenciais para os sítios catalíticos de muitas enzimas (Torres *et al.*, 2008). Entretanto, alguns elementos traço, como o chumbo (Pb), o mercúrio (Hg) e o cádmio (Cd), devido a sua natureza química que lhes permitem fixar-se em certos componentes das células e também dos tecidos (Pascalichio, 2000), podem acabar substituindo metais residuais essenciais e prejudicar o funcionamento adequado das enzimas e de demais fatores associados (Torres *et al.*, 2008).

Ao serem ingeridos pelos seres vivos, os elementos traço essenciais e não-essenciais podem se acumular ao longo do tempo, representando um risco especialmente para organismos de vida longa e de topo de cadeia. Caso não sejam excretados ou eliminados, esses elementos podem levar ao surgimento de sintomas de intoxicação (Kehrig *et al.*, 2015; Pascalichio, 2000), uma vez que são potencialmente tóxicos aos organismos, mesmo quando disponíveis em baixas concentrações (Manzini, 2010). Esse problema é ainda mais preocupante para os organismos aquáticos, que estão continuamente expostos a níveis crescentes dos contaminantes em seu ambiente (Ramos; Ramírez; Jover, 2013).

Fazer um monitoramento dos impactos causados pelos contaminantes nos animais aquáticos é um grande desafio devido aos diferentes níveis de sensibilidade dos organismos a cada tipo de elemento e à incapacidade de se avaliar quais os efeitos causados por eles a longo prazo (Torres *et al.*, 2008). Contudo, as aves marinhas são consideradas boas biomonitoras de contaminantes que se acumulam ao longo dos níveis tróficos por serem predadores de topo de cadeia (Kehrig *et al.*, 2015), sendo usadas por muitos pesquisadores como sentinelas ambientais, pois são capazes de mapear a fração biodisponível de elementos traço no ambiente,

acumulando os contaminantes em seu organismo (Beeby, 2001; Brusius *et al.*, 2021).

Apesar da relevância do pinguim-de-Magalhães como bioindicador, atualmente poucos estudos analisam sua exposição a elementos traço na costa brasileira (Silveira, 2010). Este trabalho busca contribuir para o conhecimento sobre os níveis de contaminação ambiental na região da Bacia de Santos, determinando as concentrações de elementos essenciais (Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, V e Zn) e não essenciais (As, Cd, Pb, Ba e Hg) no tecido hepático do *Spheniscus magellanicus*. Além disso, avaliamos possíveis variações em função da idade, sexo e ano de coleta, fornecendo subsídios para estratégias de conservação e gestão ambiental.

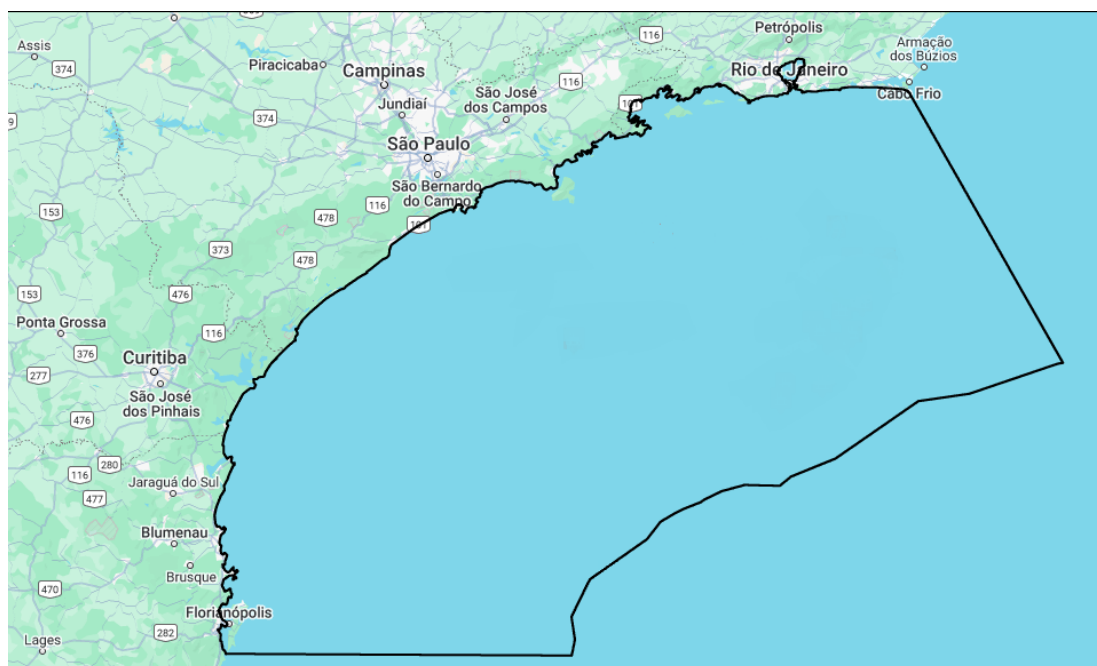
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Bacia de Santos

A Bacia de Santos é geologicamente classificada como uma bacia de margem passiva, formada por processos tectônicos de extensão provenientes da fragmentação do supercontinente Gondwana. Esse evento resultou na separação dos continentes africano e sul-americano, ocasionando a abertura do Oceano Atlântico (Rocha *et al.*, 2021).

Com uma área superior a 350 mil quilômetros quadrados, a Bacia de Santos é a maior bacia sedimentar offshore do Brasil. Localiza-se na margem continental Sudeste, entre os Altos do Cabo Frio (23°30'S) e Florianópolis (28°00'S), fazendo fronteira ao norte com a Bacia de Campos e ao sul com a Bacia de Pelotas, a oeste com a Serra do Mar e a leste com o Platô de São Paulo (Kampel *et al.*, 2023).

Figura 1 – Área de estudo, Bacia de Santos



Fonte: Petrobras, 2025

Além de apresentar um grande papel econômico, a Bacia de Santos também possui alta relevância ecológica e social, pois abriga uma rica gama de biodiversidade marinha, auxiliando significativamente no ciclo do carbono no Atlântico Sudoeste (Kampel *et al.*, 2023). A área é também caracterizada por possuir uma intensa atividade humana, na qual estão localizados portos de destaque, como

os de Santos, Paranaguá, Itajaí e Rio de Janeiro, e grandes cidades, tais quais Florianópolis, Rio de Janeiro e Santos (Kampel *et al.*, 2023).

Unidades de Conservação, como a Reserva Extrativista do Arraial do Cabo, Áreas de Proteção Ambiental da Baía de Paraty e da Baleia Franca, além de parques, como o Parque Nacional do Superagui e o Parque Estadual da Ilha do Mel, asseguram a proteção ambiental da Bacia de Santos. Sendo estas instituições responsáveis pelo equilíbrio entre a exploração econômica e a conservação dos ecossistemas que compõem essa região (Kampel *et al.*, 2023).

Devido às características apontadas, a Bacia de Santos é um local de extrema importância para a transição de espécies de aves do hemisfério norte e sul, pois muitas dessas aves ocorrem nessa região sazonalmente, utilizando a área tanto para forrageamento quanto para nidificação (Valls *et al.*, 2023).

2.2. PMP-BS

O Projeto de Monitoramento de Praias da Bacia de Santos (PMP-BS) é um dos projetos de destaque que visa atender à demanda de licenciamento ambiental da Petrobras em sua exploração e produção de petróleo e gás natural na região da Bacia de Santos. O PMP-BS abrange os Estados de Santa Catarina, Paraná, São Paulo e Rio de Janeiro, e realiza o monitoramento das praias desses estados. Tem como objetivo a conservação ambiental, sendo seu foco principal os ecossistemas costeiros e marinhos, com atividades que vão desde pesquisas, educação ambiental, avaliação de resíduos sólidos antropogênicos em ambientes marinhos e costeiros, até resgate e reabilitação de animais marinhos (Gallo Neto *et al.*, 2021; Petrobras, 2023).

O projeto, conduzido pelo IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) tem como principal objetivo avaliar os impactos dessas atividades sobre a fauna marinha, utilizando-se do monitoramento das praias, além do atendimento veterinário aos animais resgatados com vida, e necropsia daqueles que são encontrados mortos (Gallo Neto *et al.*, 2021; Petrobras, 2023).

O monitoramento é realizado em 15 trechos, começando em Santa Catarina no Trecho 1 em Laguna e Imbituba, coordenado pela UDESC. O Trecho 2 engloba Imbituba, Garopaba, Paulo Lopes, Palhoça, São José, Florianópolis (continente) e Biguaçu, sendo coordenado pelo Instituto Australis, enquanto o Trecho 3 em

Florianópolis (ilha), é monitorado pela associação R3 Animal. O Trecho 4 que estende-se desde Governador Celso Romano até a Barra Velha, é monitorado pela Univali, e o Trecho 5, em Araquari, Balneário Barra do Sul, São Francisco do Sul e Itapoá, é coordenado pela Univille (Petrobras, 2023).

No Paraná, o Trecho 6 abrange Guaratuba, Matinhos, Pontal do Paraná, Paranaguá e Guaraqueçaba, sendo monitorado pela UFPR. Já em São Paulo, o Trecho 7 abrange Cananéia, Ilha Comprida e Iguape, sendo coordenado pelo IPeC, e o Trecho 8, que vai desde Peruíbe até a Praia Grande, é monitorado pelo Biopesca. O Trecho 9 abrange São Vicente, Santos, Guarujá e Bertioga, e é coordenado pelo Instituto Gremar. O trecho 10, também em São Paulo, abrange São Sebastião, Ilhabela, Caraguatatuba e Ubatuba, sendo monitorado pelo Instituto Argonauta (Petrobras, 2023).

No Rio de Janeiro, o Trecho 11 que cobre Paraty, o Trecho 12 que abrange Angra dos Reis e Mangaratiba, o Trecho 13, que cobre Rio de Janeiro, Magé e São Gonçalo, o Trecho 14, que vai de Guaratiba a São Gonçalo e por fim o Trecho 15, que inclui São Gonçalo, Niterói, Maricá e Saquarema, são todos coordenados pela Econservation (Petrobras, 2023).

Os animais encontrados já sem vida, em um estado de decomposição inicial ou moderada, são encaminhados para uma necropsia, onde são analisadas a causa da morte do animal e se houve interações com atividades humanas, assim como a pesca, colisão com embarcações e contaminação por óleo (Petrobras, 2023).

2.3. Bioacumulação, Biomagnificação e Bioconcentração

Nos ecossistemas, contaminantes químicos podem se acumular em organismos por meio de diferentes processos, influenciando a saúde ambiental da biodiversidade. Entre os principais mecanismos envolvidos estão a bioacumulação, biomagnificação e a bioconcentração, que determinam a forma como substâncias potencialmente tóxicas, como elementos traço entre outros, são absorvidas, acumuladas e transferidas ao longo da cadeia alimentar (Schäfer *et al.*, 2015).

A bioacumulação é o processo pelo qual substâncias químicas, assim como elementos traço e compostos orgânicos persistentes, são absorvidas e acumuladas nos tecidos dos organismos ao longo do tempo. Isso ocorre devido a taxa de absorção da substância ser maior que a taxa de eliminação, ocasionando no acúmulo progressivo nos organismos (Schäfer *et al.*, 2015). A bioacumulação pode

acontecer através da exposição direta ao ambiente ou pela ingestão de organismos contaminados (Tesán-onrubia *et al.*, 2023).

A bioconcentração, por sua vez, é um fenômeno distinto, que ocorre quando as substâncias químicas são absorvidas diretamente do meio ambiente pelos organismos, sem levar em consideração a via alimentar, como em peixes e moluscos, que podem absorver contaminantes dissolvidos na água através de suas brânquias e tecidos epiteliais (Schäfer *et al.*, 2015; Mackay *et al.*, 2018).

Já a biomagnificação é caracterizada pelo aumento progressivo da concentração de substâncias químicas à medida que se sobe na cadeia alimentar, sendo decorrente da alimentação dos predadores, que ao ingerir organismos que já possuem contaminantes bioacumulados, acabam por amplificar a contaminação dos níveis tróficos superiores (Mackay *et al.*, 2018; Tesán-onrubia *et al.*, 2023).

2.4. Estudos de elementos traço no pinguim-de-magalhães

Diferentes tecidos podem ser utilizados para monitorar concentrações de contaminantes nas aves, sendo que cada tecido é responsável por fornecer uma informação valiosa distinta. O sangue por exemplo é útil para avaliar a concentração de elementos traço circulantes no organismo, ou seja, ele indica a exposição recente do indivíduo ao contaminante. Por outro lado, temos o rim, que é um dos principais locais de acúmulo do Cd, sendo um bom tecido para análise desse elemento em específico (Lima *et al.*, 2022a). As penas, por sua vez, são um método não invasivo para monitorar a exposição aos elementos traço, podendo indicar a contaminação ambiental (exposição externa) e também o processo de excreção do metal pelo organismo (Lima *et al.*, 2022a). Por fim, o fígado é um bom tecido para apresentar uma contaminação a longo prazo por se tratar de um órgão acumulador e responsável pela desintoxicação de substâncias tóxicas do organismo (Borlini, 2013).

Estudos recentes têm investigado os níveis de elementos traço em pinguins. Celis (2023) analisou penas de pinguins-de-magalhães (*Spheniscus magellanicus*) coletadas na Ilha Magdalena (Patagônia Chilena) durante o verão austral de 2011. No estudo as penas foram seccionadas em três partes (cálamo, porção média e ponta) para avaliar a distribuição dos elementos ao longo da estrutura da pena. Além disso, os autores analisaram os isótopos estáveis de nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$), carbono

($\delta^{13}\text{C}$) e enxofre ($\delta^{34}\text{S}$) para investigar possíveis influências ecológicas na bioacumulação dos metais. Os dados obtidos estão presentes na tabela abaixo:

Tabela 1 – Níveis de elementos traço ($\mu\text{g.g}^{-1}$ peso seco) ao longo de toda a pena dos pinguins de Magalhães da Ilha Magdalena, Patagônia Chilena.

Elemento	Seção A			Seção B			Seção C		
	Média	DP	Mín - Máx	Média	DP	Mín - Máx	Média	DP	Mín - Máx
As	0,04	0,01	0,03-0,05	0,12	0,07	0,05-0,19	0,13	0,01	0,11-0,15
Cd	0,05	0,02	0,04-0,08	0,28	0,28	0,06- 0,18	0,45	0,06	0,39-0,49
Pb	0,26	0,01	0,25-0,27	0,88	0,77	0,36-1,77	1,42	0,22	1,17-1,61
Ba	1,90	1,64	0,84-3,79	2,29	0,39	1,85-2,60	3,66	0,99	2,88-4,79
Cr	0,30	0,08	0,21-0,38	0,43	0,05	0,37-0,47	0,59	0,08	0,5-0,65
Cu	13,69	4,83	9,05-18,69	18,72	2,85	16,40-21,90	11,68	0,52	11,1-12,1
Mn	2,29	1,26	0,91-3,39	2,41	0,54	1,79-2,74	9,61	1,31	8,34-10,96
Ni	0,44	0,20	0,23-0,64	0,68	0,14	0,53-0,79	4,69	0,57	4,04-5,08
V	0,33	0,19	0,14-0,52	0,51	0,12	0,38-0,59	1,66	0,12	1,55-1,8
Zn	106,2	4,21	106-110,50	186,30	49,27	153,1-243	127,3	9,50	117-135,80

Fonte: Celis (2023)

Kehrig *et al.* (2015) realizaram um estudo para determinar as concentrações dos elementos traço em pinguins, através de amostras de penas, fígado e rins de pinguim-de-magalhães encontrados encalhados no sul do Brasil. Os resultados das concentrações no fígado dos pinguins estão apresentados na tabela a seguir.

Tabela 2 – Concentração de elementos traço no fígado de pinguins ($\mu\text{g.g}^{-1}$ peso seco).

Elemento	Concentrações médias $\pm$ DP	Mín-Máx
Hg	5,70 $\pm$ 3,73	1,98-18,07
Cd	1,93 $\pm$ 0,92	0,69-3,76
Pb	0,58 $\pm$ 0,32	0,20-1,23

Se	5,15 ± 2,82	1,85-13,63
----	-------------	------------

Fonte: Kehrig *et al.* (2015)

Alguns estudos foram realizados com pinguins de outras espécies, como é o caso do estudo realizado por Matcheva *et al.* (2006), no qual utilizaram Pinguins-de-barbicha (*Pygoscelis antarctica*) e Pinguins-papua (*Pygoscelis papua*) coletados na Ilha Livingston, Antártica, entre janeiro e março de 2002 e 2003. Foram coletadas penas das regiões do pescoço e das costas, as quais foram posteriormente lavadas, secas e preparadas para análise de elementos como Na, K, Mg, Ca, P, Fe, Cu, Zn, Pb e As. Foi realizada uma comparação entre as espécies, e os resultados obtidos encontram-se sistematizados na tabela abaixo.

Tabela 3 – Concentrações dos principais elementos essenciais e oligoelementos ($\mu\text{g g}^{-1}$ peso seco) em penas de pinguins adultos *Pygoscelis papua* e *Pygoscelis antarctica* da Ilha Livingston - Antártica.

Elemento	2002		2003	
	Concentrações médias ± DP		Concentrações médias ± DP	
	<i>P. papua</i>	<i>P. antarctica</i>	<i>P. papua</i>	<i>P. antarctica</i>
As	0,88 ± 0,32	0,45 ± 0,2	Max 4,0 min <6,0	Max 2,4 min <0,6
Cd	0,21 ± 0,06	0,3 ± 0,07	Max 0,43 min <0,15	Max 0,2 min <0,15
Pb	1,7 ± 1,3	1,8 ± 0,94	1,57 ± 1,13	1,66 ± 1,2
Cu	17 ± 4	19 ± 3	16 ± 2	18 ± 2
Mn	1,5 ± 0,73	1,4 ± 0,7	2,6 ± 0,99	1,6 ± 0,43
Ni	0,84 ± 0,39	0,65 ± 0,23	2,2 ± 0,9	0,75 ± 0,27
Zn	106 ± 8	99 ± 5	89 ± 7	75 ± 7

Fonte: Matcheva *et al.* (2006)

Um estudo realizado por Espejo *et al.* (2020), coletou penas de pinguins-adélia (*Pygoscelis adeliae*) adultos em quatro locais da Península Antártica

Ocidental utilizando redes de cabo longo. Durante a captura, também foram realizadas medições morfológicas dos indivíduos. As penas foram lavadas, secas, moídas e digeridas em ácido de alta pureza. Os dados obtidos após o tratamento estatístico estão sistematizados na tabela abaixo.

Tabela 4 – Concentrações (valor médio $\pm$ desvio padrão) de elementos traço ($\mu\text{g.g}^{-1}$ peso seco) em penas de *Pygoscelis adeliae* adulto da Antártida Ocidental Área da Península.

Elemento	Local			
	Ardley Island Concentrações (valor médio $\pm$ desvio padrão)	Base O'Higgins Concentrações (valor médio $\pm$ desvio padrão)	Kopaitic Island Concentrações (valor médio $\pm$ desvio padrão)	Aretowski Concentrações (valor médio $\pm$ desvio padrão)
Cd	1,12 $\pm$ 0,30	0,60 $\pm$ 0,16	0,44 $\pm$ 0,33	0,32 $\pm$ 0,12
Pb	0,03 $\pm$ 0,06	0,005 ND	0,002 $\pm$ 0,00	0,001 ND
Cr	1,75 $\pm$ 0,18	1,59 $\pm$ 0,16	1,70 $\pm$ 0,22	1,54 $\pm$ 0,15
Cu	9,92 $\pm$ 1,77	8,42 $\pm$ 1,57	7,71 $\pm$ 1,49	5,85 $\pm$ 1,50
Mn	0,20 $\pm$ 0,20	6,38 ND	0,38 $\pm$ 0,94	0,20 $\pm$ 0,42
Ni	0,65 $\pm$ 0,15	0,38 $\pm$ 0,12	0,39 $\pm$ 0,28	0,15 $\pm$ 0,08
V	0,34 $\pm$ 0,10	0,33 $\pm$ 0,06	0,36 $\pm$ 0,07	0,44 $\pm$ 0,08
Zn	60,00 $\pm$ 10,63	60,79 $\pm$ 9,54	60,98 $\pm$ 11,13	59,73 $\pm$ 16,38

Fonte: Espejo *et al.* (2020)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Sistematização dos dados

Para uma melhor análise estatística, as amostras foram agrupadas de três maneiras distintas, de acordo com:

- sexo (feminino, masculino e indefinido)
- ano de coleta (de 2016 a 2023)
- idade (filhote, juvenil, adulto e não informado)

Tabela 5 – Sistematização da quantidade de indivíduos machos, fêmeas e indefinidos

SEXO	Nº DE INDIVÍDUOS
Macho	334
Fêmea	896
Indefinido	8

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 6 – Sistematização da quantidade de indivíduos coletados ao longo dos anos

ANO DE COLETA	Nº DE INDIVÍDUOS
2016	23
2017	51
2018	171
2019	77
2020	305
2021	181
2022	278
2023	152

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 7 – Quantidade de indivíduos coletados de acordo com a idade

IDADE	Nº DE INDIVÍDUOS
Feto	0
Filhote	2
Juvenil	1217
Adulto	12
Não Informado	7

Fonte: Elaborado pela autora

3.2. Materiais e Equipamentos

Foram utilizados os seguintes materiais: Tubos plásticos; maceradores de plástico; pipetas; balança analítica; espátulas de porcelana; tubos digestores; digestor por microondas (Ethos Easy, modelo Milton MLS); liofilizador (Alpha 1-2 Ldplus-Christ); espectrômetro de massas com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS - Thermo modelo X série II– Bremen – Alemanha); espectrômetro de Fluorescência Atômica acoplada a geração de vapor frio e capela de fluxo laminar.

3.3. Soluções e Reagentes

Foram utilizados os seguintes reagentes: Ácido nítrico bidestilado abaixo do ponto de ebulição; ácido clorídrico bidestilado abaixo do ponto de ebulição; soluções padrões para elementos traço; amostras de materiais biológicos de referência e certificados e solução de padrão interno: ^6Li , ^{45}Sc , ^{89}Y , ^{103}Rh , ^{115}In , ^{159}Tb , ^{169}Ho , ^{209}Bi para ICP-MS.

3.4. Pré-tratamento e armazenamento de amostras

As amostras de fígado do pinguim-de-magalhães (1238 amostras) foram fornecidas pelo Projeto de Monitoramento de Praias da Bacia de Santos (PMP-BS), realizado no Centro de Estudos Ambientais da UNESP (CEA/UNESP), sendo o uso dessas amostras autorizado pela Petrobrás. Dessa forma, as amostras recebidas foram submetidas a um pré-tratamento, tendo início com uma homogeneização através da ação mecânica (maceração) e por fim, sendo armazenado em um ultrafreezer até ser submetido à liofilização (Pedrobom, 2020).

3.5. Liofilização

Para o processo de liofilização, as amostras congeladas foram conduzidas ao liofilizador por um período de 72h aproximadamente. Após esse período, as amostras secas foram submetidas a uma nova maceração e posteriormente armazenadas em tubos plásticos que foram previamente descontaminados (para que não haja possibilidade de contaminação cruzada) (Pedrobom, 2020).

3.6. Digestão para determinação de elementos traço

Para o processo de digestão de todos elementos (com exceção do Hg), foi adicionado 0,175 g de tecido liofilizado (e previamente pesados em balança analítica) nos tubos, e 8 mL de HNO₃ concentrado. Na sequência, os tubos foram encaminhados para o digestor Ethos Easy, modelo MiltoneMLS (Pedrobom, 2020). Para a determinação do Hg, o processo é semelhante, entretanto nos tubos digestores foi adicionado 0,5 g de tecido hepático "*in natura*", além de 2 mL de ácido HNO₃ concentrado e 6 mL HCl, sendo essencial para não ocorrer a perda das concentrações de Hg (Pedrobom, 2020).

3.7. Determinações: Espectrômetro de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS)

Após os processos de digestão e diluição dos tecidos hepáticos, os elementos traço foram determinados através de um espectrômetro de massas com plasma acoplado indutivamente. O ICP-MS foi calibrado e otimizado antes de cada análise realizada para a construção das curvas analíticas.

3.8. Determinações: CV-AFS

Após os processos de digestão da amostra e a redução do mercúrio presente nas soluções, a determinação desse elemento foi realizada por meio da espectrometria atômica com vapor frio (CV-AFS), o qual foi calibrado e otimizado antes de cada análise, de forma a garantir a precisão dos resultados por meio da verificação periódica de padrões analíticos e amostras de referência certificadas.

3.9. Tratamento estatístico

Foram utilizados para análises estatísticas as variações entre o sexo e idade dos pinguins-de-magalhães, além das variações interanuais de acordo com as concentrações dos elementos de interesse. Para a avaliação dessas variações, foram utilizados os testes de Kruskal-Wallis e Student Newman-Keuls. O processamento dos dados e dos testes estatísticos foi realizado com o uso de softwares como o Excel e o Bioestat. Para todos os testes o nível de significância adotado foi de 5%.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após as determinações, as concentrações de cada elemento para cada grupo de amostras foram sistematizadas na tabela abaixo, com exceção dos elementos Níquel, Bário, Cromo e Chumbo, os quais em sua grande maioria estavam abaixo do limite de detecção, sendo assim desconsiderados para as análises estatísticas.

Tabela 8 – Concentrações dos elementos traço em fígado de pinguim em $\mu\text{g.g}^{-1}$ peso seco, desvio padrão, mínimo e máximo

Concentração dos elementos traço								
<i>Spheniscus</i> <i>Magellanicus</i>	As	Cd	Cu	Mn	Mo	Zn	V	Hg
Média Geral	6,88	33,57	29,44	7,49	4,48	259,48	0,33	7,00
Desvio	5,39	34,70	20,81	2,05	1,80	95,30	0,59	4,58
Faixa	0,36-56,1	0,57-18,3	0,05-	2,5-	0,05-	65,16-	0,01-	0,02-
	0	6	322,02	29,26	18,96	869,01	9,44	71,31
Fêmeas								
Média Geral	5,27	44,13	36,53	7,93	4,46	288,90	0,48	8,36
Desvio	4,00	40,80	46,73	2,14	1,65	111,51	0,77	5,00
Faixa	0,02-30,8	1,39-	0,05-	2,91-	0,91-	72,38-	0,01-	0,56-
	9	275,69	659,86	18,11	8,89	849,68	8,90	29,04
Machos								
Média Geral	6,43	36,59	31,51	7,60	4,49	267,33	0,37	7,37
Desvio	5,11	36,89	30,46	2,08	1,76	100,71	0,65	4,76
Faixa	0,02-	0,57-	0,05-	2,57-29,2	0,05-	65,16-	0,01-	0,02-
	56,10	275,69	659,86	6	18,96	869,01	9,44	71,31
Juvenil								
Média Geral	6,18	37,19	21,46	8,16	3,52	279,56	0,29	5,91
Desvio	4,29	38,68	10,62	2,03	1,97	127,03	0,46	2,93
Faixa	1,02-	1,61-	6,61-	4,62-	1,57-	105,96-	0,01-	2,41-
	13,15	142,57	35,53	11,62	8,88	513,83	1,68	12,10
Adulto								
Média Geral	4,36	21,18	17,58	6,78	4,04	166,50	0,11	4,00
Desvio	2,68	55,05	9,44	2,21	1,94	78,74	0,13	4,13
Faixa	0,64-	1,20-	5,79-	3,19-	1,90-	65,16-	0,01-	0,56-
	11,62	275,69	40,29	11,49	7,77	406,47	0,49	18,59
2016								
Média Geral	6,34	22,90	27,13	8,19	3,50	264,74	1,13	3,75
Desvio	5,18	18,72	16,81	3,50	1,49	144,24	2,37	2,18
Faixa	0,36-	1,61-	10,87-	5,14-	0,65-	98,39-	0,01-	0,29-
	27,78	81,09	121,83	29,26	7,58	869,01	9,44	7,80
2017								
Média Geral	5,33	24,72	23,96	6,97	3,65	224,58	0,14	6,90
Desvio	3,25	27,25	12,20	1,57	1,19	82,72	0,21	4,27

Faixa	0,62- 19,30	2,44- 212,02	6,61- 85,92	3,22- 13,28	1,35- 7,13	86,81- 462,54	0,01- 1,43	1,06- 29,04
2018								
Média Geral	5,54	52,73	40,75	7,58	4,33	298,00	0,50	6,14
Desvio	3,46	46,18	47,79	1,76	1,59	90,13	0,42	3,26
Faixa	0,61- 16,55	3,53- 188,48	4,87- 322,02	3,60- 11,62	1,38- 10,32	90,09 -658,22	0,01- 2,08	1,72- 18,31
2019								
Média Geral	5,02	46,10	34,97	7,71	4,88	262,25	0,15	6,70
Desvio	3,61	43,78	19,89	2,01	2,04	83,64	0,13	3,45
Faixa	0,72- 21,36	0,71- 245,43	8,09- 118,18	2,91- 17,87	1,27- 18,96	100,60- 518,63	0,01- 1,09	1,13- 28,68
2020								
Média Geral	8,12	37,70	33,59	7,86	4,60	263,53	0,68	8,29
Desvio	5,52	39,13	36,26	2,04	1,82	98,85	0,47	6,48
Faixa	0,93- 30,89	1,62- 215,14	8,53- 474,75	2,57- 13,73	1,78- 12,41	74,79- 593,72	0,02- 3,45	1,10- 71,31
2021								
Média Geral	7,78	28,26	28,86	7,92	4,35	273,97	0,27	7,36
Desvio	5,30	24,94	40,71	2,07	1,61	106,66	0,41	3,90
Faixa	0,02- 33,67	3,26- 191,14	0,05- 659,86	3,41- 18,11	0,91- 9,84	89,48- 644,90	0,01- 2,60	0,59- 24,02
2022								
Média Geral	6,81	43,28	31,88	7,09	5,20	319,06	0,58	10,43
Desvio	7,56	32,85	14,97	1,97	1,43	99,85	0,50	5,70
Faixa	0,62- 56,10	3,97- 245,83	10,45- 133,44	2,96- 13,29	1,49- 8,92	133,35- 849,68	0,04- 2,70	0,02- 60,07
2023								

Fonte: Elaborado pela autora

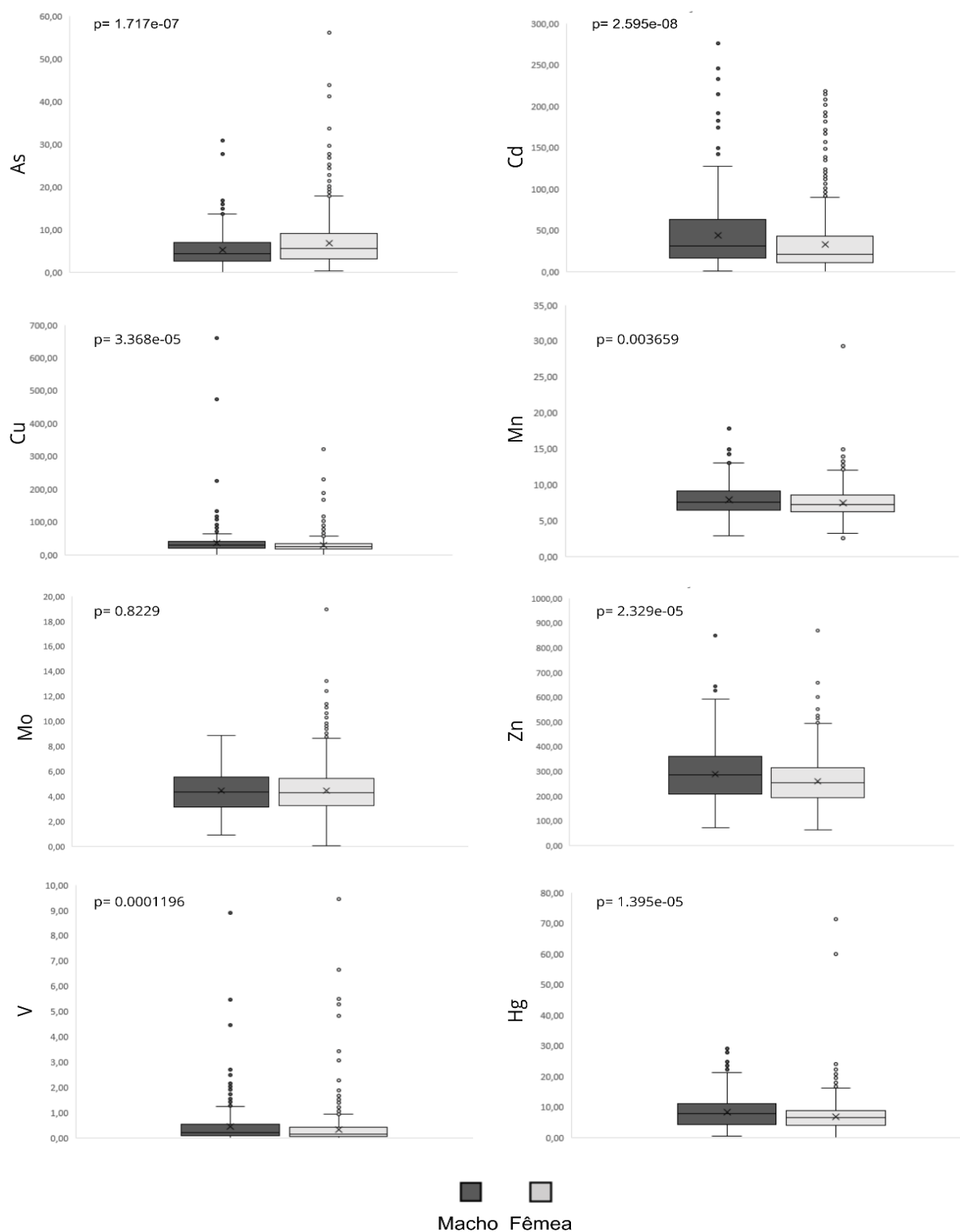
4.1. Diferença nos níveis de elementos traço por sexo

Ao comparar a diferença nos níveis de elementos traço de acordo com o sexo, a análise estatística revelou diferenças significativas. Para os elementos As ($p = 1.717e-07$), Cd ($p = 2.595e-08$), Cu ($p = 3.368e-05$), Mn ($p = 0.003$), Zn ($p = 2.329e-05$), V ($p = 0.0001$) e Hg ($p = 1.395e-05$) houve diferença estatisticamente significativa entre os machos e as fêmeas, essas diferenças sugerem a influência de fatores fisiológicos e metabólicos na bioacumulação, possivelmente relacionados a mecanismos de eliminação de metais, como a deposição de Hg e Cd nos ovos durante a reprodução. Esse fenômeno foi descrito por Bighetti *et al.* (2021) em *Sula leucogaster*, onde a ausência de diferença nos níveis de mercúrio entre os sexos foi atribuída à eliminação do metal pelas fêmeas via postura de ovos. Assim, a maior ou menor retenção de elementos traço entre os sexos pode estar associada ao metabolismo diferencial e às estratégias fisiológicas de detoxificação.

Entretanto, os elementos Cr ($p = 0.9836$), Pb ($p = 0.2659$), Mo ($p = 0.8229$), Ba ($p = 0.2332$) e Ni ($p = 0.4329$) não mostraram diferenças significativas entre machos e fêmeas, o que indica uma distribuição mais homogênea desses elementos nos dois gêneros. Essa homogeneidade pode estar relacionada a características químicas desses elementos, que podem ter rotas de absorção e excreção menos influenciadas por fatores fisiológicos reprodutivos (Bighetti *et al.*, 2021).

As diferenças significativas apresentadas em alguns elementos, tais quais o Hg e o Cd, podem ser associadas não apenas a processos fisiológicos, mas também a diferenças comportamentais, como padrões alimentares e estratégias de forrageamento. Estudos prévios demonstram que em aves marinhas, machos e fêmeas podem explorar nichos alimentares distintos, o que impacta a exposição diferencial a contaminantes metálicos (Bighetti *et al.*, 2021). Além disso, a taxa metabólica pode influenciar a absorção e excreção desses elementos, sendo um fator adicional a ser considerado na interpretação das diferenças observadas entre os sexos (Bighetti *et al.*, 2021).

Figura 2 – Gráficos da distribuição dos elementos traço ($\mu\text{g.g}^{-1}$) em macho e fêmea



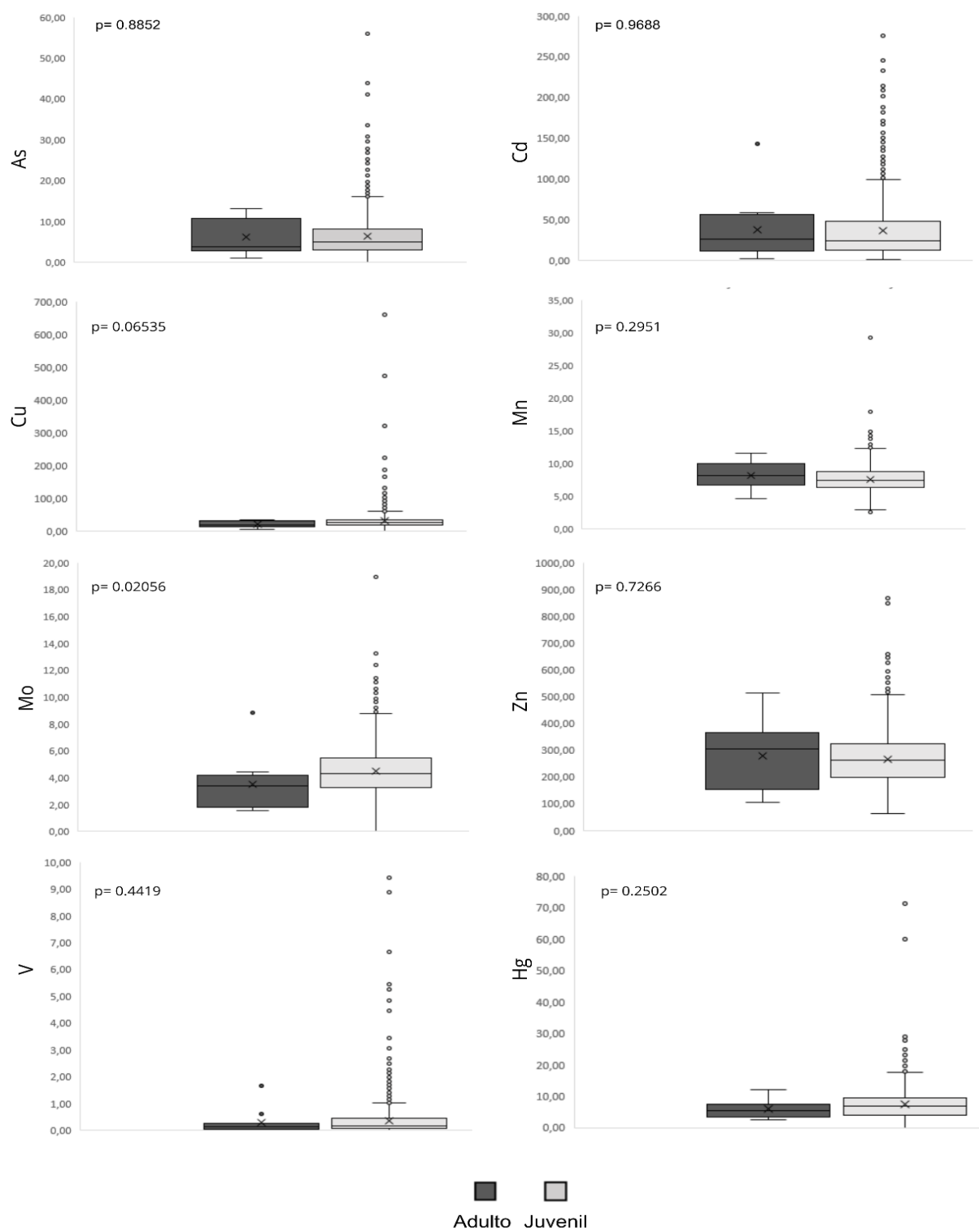
Fonte: Elaborado pela autora

4.2. Influência da idade na concentração de elementos traço

A diferença estatisticamente significativa observada na bioacumulação do molibdênio ($p = 0.02056$) entre os grupos de idade sugere que esse metal pode estar associado ao envelhecimento dos indivíduos, possivelmente ocasionado por mudanças fisiológicas na excreção e metabolismo. Apesar de estudos específicos sobre a bioacumulação do Mo em aves marinhas não serem facilmente encontrados, algumas pesquisas com outros elementos traço indicam que a bioacumulação pode ser influenciada pela idade (Vizuite et al., 2022). Vizuite *et al.* (2022), ao realizar uma pesquisa com gaivotas-de-patas-amarelas (*Larus michahellis*) concluíram que a bioacumulação de elementos traço pode variar de acordo com a idade, o sexo e fatores ambientais, reforçando a hipótese de que elementos como o molibdênio podem se acumular diferencialmente ao longo da vida de aves marinhas, em decorrência de possíveis alterações na fisiologia do metabolismo e excreção desses metais.

Por outro lado, os demais elementos analisados As ($p = 0.8852$), Cd ($p = 0.9688$), Cr ($p = 0.6939$), Cu ($p = 0.06535$), Pb ($p = 0.1557$), Mn ($p = 0.2951$), Zn ($p = 0.7266$), Ba ($p = 0.1233$), Ni ($p = 0.4329$), V ($p = 0.4419$) e Hg ($p = 0.2502$), não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre os grupos de idade, sugerindo que a bioacumulação desses elementos pode ser mais influenciada por fatores ambientais do que pela idade, como já apontado por estudos anteriores que indicam que a distribuição de elementos traço podem depender da exposição ambiental e não apenas da biologia dos indivíduos (Gochfeld *et al.*, 1987; Vizuite *et al.*, 2022).

Figura 3 – Gráfico da distribuição dos elementos traço ($\mu\text{g.g}^{-1}$) em indivíduos juvenis e adultos



Fonte: Elaborado pela autora

4.3. Variação temporal na contaminação por elementos traço

A análise realizada ao longo dos anos demonstrou alterações estatisticamente significativas para a maioria dos elementos, incluindo As, Cd, Cr, Cu, Pb, Mo, Zn, Ba, V e Hg ($p < 2.2e-16$). Essa variação significativa sugere mudanças ambientais e possíveis impactos antrópicos na área de estudo. Estudos anteriores corroboram essa tendência, indicando que a bioacumulação de elementos traço em *Spheniscus magellanicus* pode variar ao longo do tempo em resposta a fatores ambientais e contaminantes antropogênicos, assim como Branco (2010), um estudo no qual avaliaram as concentrações de mercúrio total em pinguins-de-magalhães encalhados na costa brasileira entre os anos de 2006 e 2008, e encontraram variações significativas na bioacumulação para alguns metais, de forma que essas diferenças foram associadas a mudanças ambientais e possíveis variações nas fontes de poluição ao longo dos anos.

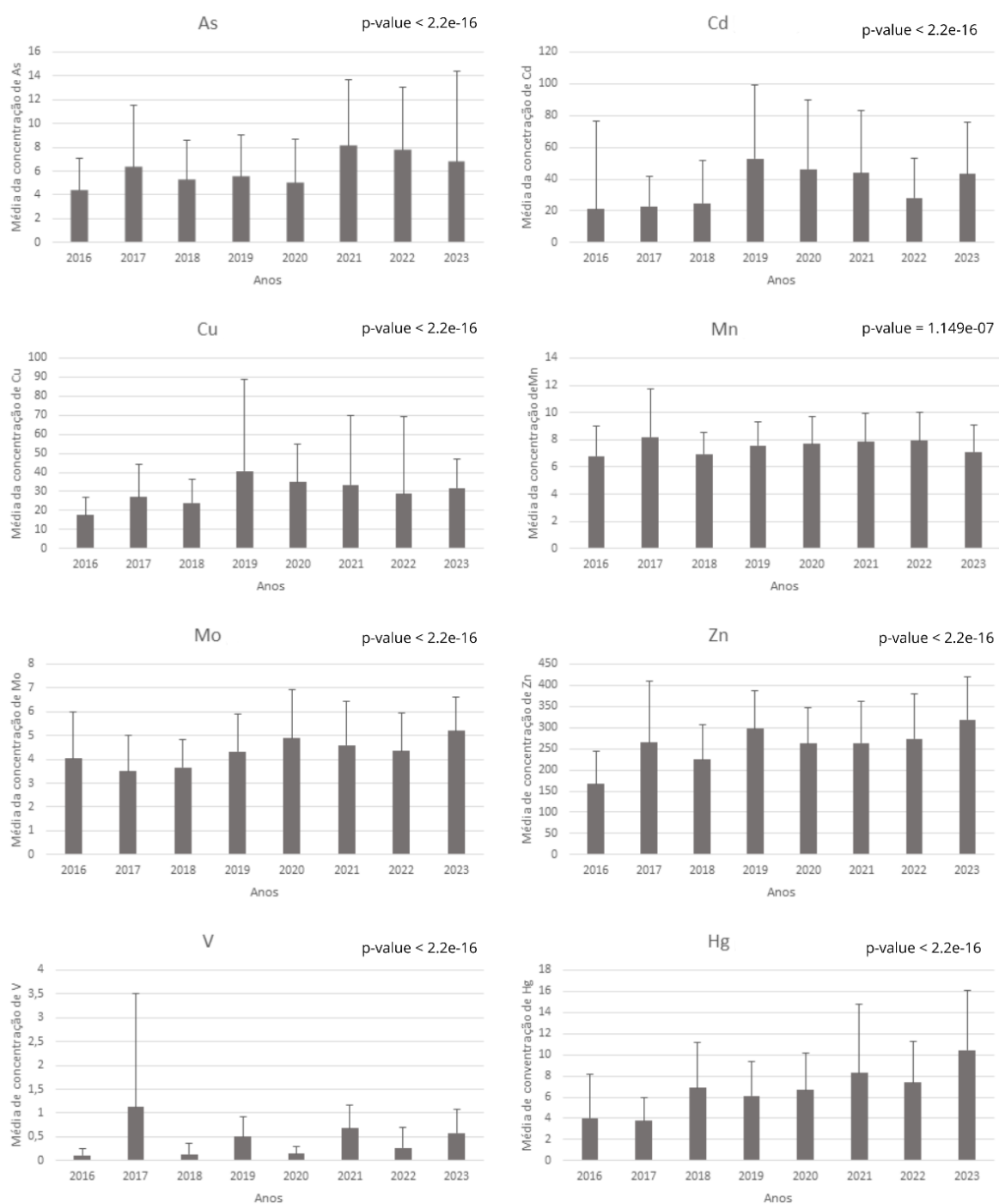
Além desse estudo, Ruiz (2008) analisou o *Spheniscus magellanicus* como indicador de saúde ambiental, identificando variações nas concentrações de elementos traço, incluindo Cd e Pb, entre diferentes grupos de pinguins juvenis. Dessa forma, a variação foi associada tanto a fatores ambientais quanto a possíveis alterações na exposição desses indivíduos a contaminantes em diferentes períodos e locais.

Para o Mn, a diferença significativa observada ($p = 1.149e-07$) pode indicar uma alteração na disponibilidade desse elemento no ecossistema ao longo do tempo. Estudos anteriores demonstram que a mobilidade e solubilidade de manganês podem ser influenciadas por processos naturais assim como as mudanças no potencial redox e na composição da água do mar, assim como por variações nas cadeias tróficas (Green *et al.*, 2003). Ademais, fatores antropogênicos, tais quais a poluição industrial e a drenagem ácida de minas, podem ocasionar no aumento da liberação e a da disponibilidade deste metal no ambiente, tornando mais facilmente acessível para organismos marinhos (Green *et al.*, 2003).

A bioacumulação de elementos traço em aves marinhas tem sido amplamente associada a variações na poluição ambiental e nas mudanças nos padrões de disponibilidade dos metais nos ecossistemas, fato que evidencia a relevância de se fazer um monitoramento contínuo nesses ambientes, a fim de entender como esses contaminantes impactam o meio ao longo do tempo (Ruiz, 2008; Branco, 2014).

Esses resultados reforçam a necessidade e a importância do monitoramento dos níveis de elementos traço nos pinguins, dado que as variações anuais podem estar associadas a mudanças no padrão da poluição marinha por contaminantes e também a outros fatores ambientais diretamente associados à saúde da fauna marinha.

Figura 4 – Gráfico da distribuição dos elementos traço ($\mu\text{g.g}^{-1}$) em indivíduos juvenis e adultos



Fonte: Elaborado pela autora

5. CONCLUSÃO

Este estudo contribuiu para o entendimento da distribuição de elementos traço em pinguim-de-magalhães (*Spheniscus magellanicus*). A análise das concentrações de elementos essenciais e não essenciais no tecido hepático dos pinguins mostrou significativas variações em função da idade, sexo e ano de coleta do indivíduos, destacando a complexidade da bioacumulação.

Os resultados obtidos neste trabalho indicam que a bioacumulação de elementos traço, tais quais As, Cu, Mo, Cd e Hg está diretamente relacionada a fatores fisiológicos, comportamentais e ambientais. As diferenças apontadas entre machos e fêmeas, assim como em diferentes grupos etários, sugerem que a absorção e excreção desses elementos pode ser influenciada tanto por fatores biológicos quanto pela exposição a esses contaminantes no ambiente. Além disso, as variações interanuais nas concentrações desses elementos indicam mudanças ambientais e possíveis impactos causados pela contaminação ambiental, fato que reforça a necessidade de um monitoramento contínuo dessas áreas.

Diante dos dados obtidos com esse estudo, da crescente exploração dos recursos da Bacia de Santos e das ameaças evidentes à biodiversidade marinha, é de extrema importância implementar estratégias de conservação e gestão ambiental. O uso do pinguim-de-magalhães como bioindicador se mostrou uma ferramenta valiosa para avaliar a saúde dos ecossistemas marinhos, podendo ser usado como uma forma de direcionar ações de mitigação de impactos. Com isso, a continuidade das pesquisas sobre contaminação ambiental e a saúde da fauna marinha é essencial para garantir a preservação dos ecossistemas e demais fatores associados, assim como a sustentabilidade das atividades antropogênicas na região.

6. REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, R. L. **GRAVIMETRIA E EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO NA BACIA DE SANTOS**. 2007. 101 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro - Rio de Janeiro, 2007
- BEEBY, A. What do sentinels stand for?. **Environmental Pollution**, [s. l.], v. 112, n. 2, p. 285–298, 2001.
- BIGHETTI, G.P. *et al.* Bioaccumulation of mercury is equal between sexes but different by age in seabird (*Sula leucogaster*) population from southeast coast of Brazil. **Environmental Pollution**, [S.L.], v. 285, p. 117222, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117222>.
- BORLINI, T. C. ANÁLISE DE METAIS PESADOS EM AVES DE RAPINA DE VIDA LIVRE COMO BIOINDICADORES AMBIENTAIS. [s. l.], 2013.
- BRANCO, J. Aves Marinhas. Apostila de Nectologia do Curso de Oceanografia do CTTMar, 2004.
- BRUSIUS, B. K. Effects of environmental variables on Magellanic penguin (*Spheniscus magellanicus*) strandings in southeastern Brazil. **Ocean and Coastal Management**, [s. l.], 2021.
- CELIS, J. E. *et al.* Age-related bioaccumulation of rare earth elements in feathers of Magellanic penguins (*Spheniscus magellanicus*) from the Chilean Patagonia. **Environmental Research**, [s. l.], v. 265, p. 120477, 2025.
- CELIS, J. E. *et al.* Burden of rare earth elements and trace elements in feathers of magellanic penguins (*Spheniscus magellanicus*) from the southern Chilean Patagonia. **Marine Pollution Bulletin**, [s. l.], v. 194, p. 115364, 2023.
- DANTAS, G. P. M. *et al.* Demographic history of the Magellanic Penguin (*Spheniscus magellanicus*) on the Pacific and Atlantic coasts of South America. **Journal of Ornithology**, [s. l.], v. 159, n. 3, p. 643–655, 2018.
- ESPEJO, W. *et al.* Trace metal concentrations and body condition in adult Adélie penguins (*Pygoscelis adeliae*) from the western Antarctic Peninsula. **Latin American Journal of Aquatic Research**, [s. l.], v. 48, n. 5, p. 886–894, 2020.
- MANZINI, F.; BATISTA DE SÁ, K.; MARIA DE ALMEIDA PLICAS, L. METAIS PESADOS: FONTE E AÇÃO TOXICOLÓGICA. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta**

Paulista, [s. l.], v. 6, n. 12, 2010. Disponível em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/forum_ambiental/article/view/26.

Acesso em: 4 mar. 2025.

GALLO, L. *et al.* Hematology, plasma biochemistry, and trace element reference values for free-ranging adult Magellanic Penguins (*Spheniscus magellanicus*). **Polar Biology**, [s. l.], v. 42, n. 4, p. 733–742, 2019.

GALLO NETO, H. *et al.* Mortality of a juvenile Magellanic penguin (*Spheniscus magellanicus*, Spheniscidae) associated with the ingestion of a PFF-2 protective mask during the Covid-19 pandemic. **Marine Pollution Bulletin**, [s. l.], v. 166, p. 112232, 2021.

GOCHFELD, M. *et al.* Factors affecting tissue distribution of heavy metals. **Biological Trace Element Research**, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 389-399, abr. 1987. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02796695>.

GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, D. *et al.* Source and Fate of Heavy Metals in Marine Sediments from a Semi-Enclosed Deep Embayment Subjected to Severe Anthropogenic Activities. **Water, Air, & Soil Pollution**, [s. l.], v. 221, n. 1–4, p. 191–202, 2011.

GREEN, C. H. *et al.* Solubilization of Manganese and Trace Metals in Soils Affected by Acid Mine Runoff. **Journal Of Environmental Quality**, [S.L.], v. 32, n. 4, p. 1323-1334, jul. 2003. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2134/jeq2003.1323>.

IUCN, BirdLife International. 2020. *Spheniscus magellanicus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2020: e.T22697822A157428850. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2020-3.RLTS.T22697822A157428850.en>

KAMPEL, M. *et al.* ANÁLISE DE TENDÊNCIA DE VARIÁVEIS METEOCEANOGRÁFICAS ESTIMADAS POR SATÉLITE NA BACIA DE SANTOS. [s. l.],

KEHRIG, H. A. *et al.* Trace-elements, methylmercury and metallothionein levels in Magellanic penguin (*Spheniscus magellanicus*) found stranded on the Southern Brazilian coast. **Marine Pollution Bulletin**, [s. l.], v. 96, n. 1–2, p. 450–455, 2015.

LIMA, G. D. S. *et al.* WATERBIRDS AS CADMIUM SENTINELS IN BRAZIL. **Instituto de Ecologia y Ciencias Ambientales**, [s. l.], v. 17, 2022a. Disponível em: [http://panamjas.org/pdf_artigos/PANAMJAS_17\(3\)_201-216.pdf](http://panamjas.org/pdf_artigos/PANAMJAS_17(3)_201-216.pdf). Acesso em: 07 mar. 2025.

LIMA, G. D. S. *et al.* Bioaccumulation of trace elements in marine mammals: New data and transplacental transfer on threatened species. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 948, p. 174854, 2024b.

LIMA, D. F.; DI BENEDITTO, A. P. M.; FRANCO, R. W. D. A. Bivalves como biomonitoradores ambientais: uma revisão de literatura. **Conjecturas**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 1142–1156, 2022.

MACKAY, Donald *et al.* Bioconcentration, bioaccumulation, biomagnification and trophic magnification: a modelling perspective. **Environmental Science: Processes & Impacts**, [S.L.], v. 20, n. 1, p. 72-85, 2018. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c7em00485k>.

METCHEVA, R. *et al.* The penguin feathers as bioindicator of Antarctica environmental state. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 362, n. 1–3, p. 259–265, 2006.

PASCALICCHIO, A. A. E. **Contaminação por metais pesados: saúde pública e medicina ortomolecular**. In: Contaminação por metais pesados: saúde pública e medicina ortomolecular. 2002. p. 132-132.

PEDROBOM, J. H. Biomonitoramento de elementos traço utilizando fígados de *Larus dominicus*, *Pontoporia Blainvilliei* e *Sotalia guianensis* amostrados na costa dos estados de Santa Catarina e São Paulo. 2020

PETROBRAS, **BIODIVERSIDADE DA BACIA DE SANTOS: O QUE JÁ CONHECEMOS**. 2022. Disponível em: <https://comunicabaciadesantos.petrobras.com.br/w/biodiversidade-da-bacia-de-santos-o-que-ja-conhecemos#:~:text=A%20Bacia%20de%20Santos%20%C3%A9,ambiental%20federal%2C%20conduzido%20pelo%20Ibama>. Acesso em: 16 jan. 2025.

PETROBRAS, **Projeto de Monitoramento de Praias(PMP)** - Comunica Bacia de Santos - Liferay DXP. 2023 Disponível em: <https://comunicabaciadesantos.petrobras.com.br/projeto-de-monitoramento-de-praias-pmp-> >.

PETROBRAS. **Mapa**, 2025 Disponível em: <https://comunicabaciadesantos.petrobras.com.br/mapa>. Acesso em: 7 jan. 2025.

PON, J. P. S. *et al.* Ingestion of marine debris by juvenile Magellanic penguins (*Spheniscus magellanicus*) in wintering grounds of coastal Argentina. **Marine Pollution Bulletin**, [s. l.], v. 193, p. 115247, 2023.

PÜTZ, K. *et al.* Winter migration of magellanic penguins (*Spheniscus magellanicus*) from the southernmost distributional range. **Marine Biology**, [s. l.], v. 152, n. 6, p. 1227–1235, 2007.

RAMOS, R.; RAMÍREZ, F.; JOVER, L. Trophodynamics of inorganic pollutants in a wide-range feeder: The relevance of dietary inputs and biomagnification in the Yellow-legged gull (*Larus michahellis*). **Environmental Pollution**, [s. l.], v. 172, p. 235–242, 2013.

ROCHA, L.; FAVORETO, J.; BORGHI, L. Coquinas da Formação Itapema, Campo de Mero (Pré-sal da Bacia de Santos): Análise de Microfácies e Paleoambiente Deposicional. **Anuário do Instituto de Geociências**, [s. l.], v. 44, 2021. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/39883>. Acesso em: 4 mar. 2025.

ROMERO, Á. F. *et al.* MAPA DE VULNERABILIDADE AMBIENTAL AO ÓLEO - UM ESTUDO DE CASO NA BACIA DE SANTOS, BRASIL. **Revista Brasileira de Cartografia**, [s. l.], v. 63, n. 3, 2012. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/43742>. Acesso em: 4 mar. 2025.

ROSA, L. F. Metais pesados no ar atmosférico – Uma revisão teórica. **Environmental Science**, [s. l.], 2024.

RUIZ, C. M. V. **El Pingüino de Magallanes (*Spheniscus magellanicus*) como Indicador de Calidad en Salud Ambiental: un estudio comparativo ecotoxicológico y de historia natural**. 2008. 72 f. Tese (Doutorado) - Curso de Saúde Pública e Meio Ambiente, Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Rio de Janeiro, 2008.

SANTOS, A. S., *et al.* **AÇÕES ANTRÓPICAS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS: implicações para o meio ambiente**. Pesquisa Científica: Estudos teóricos e práticos, [S.L.], p. 20-73, 14 nov. 2024. Seven Editora. <http://dx.doi.org/10.56238/livrosindi202473-002>

SCHÄFER, S., Buchmeier, G., Claus, E. *et al.* **Bioaccumulation in aquatic systems: methodological approaches, monitoring and assessment**. Environ Sci Eur 27, 5 (2015). <https://doi.org/10.1186/s12302-014-0036-z>

SCIOSCIA, G. *et al.* Intra- and interannual variation in the diet of the Magellanic penguin (*Spheniscus magellanicus*) at Martillo Island, Beagle Channel. **Polar Biology**, [s. l.], v. 37, n. 10, p. 1421–1433, 2014.

SILVEIRA, V. V.. **Estudo comparativo das concentrações de mercúrio total em pinguins de- magalhães (*Spheniscus magellanicus*) arribados na costa brasileira entre**

2006-2008. 2010. 76 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saúde Pública e Meio Ambiente, Ensp- Escola Nacional de Saúde Pública, Rio de Janeiro, 2010.

SOUSA, G. C. *et al.* **Contaminação por metais pesados: a ameaça dos poluentes ao oceano e à saúde humana:** despejo inadequado de resíduos industriais e do lixo doméstico tem causado danos significativos ao oceano, resultando em impactos quase irreparáveis. 2023. Disponível em: <https://jornal.usp.br/atualidades/contaminacao-por-metais-pesados-a-ameaca-dos-poluentes-aos-oceanos-e-a-saude-humana/>. Acesso em: 14 jan. 2025.

SOUZA, A. K. R.; MORASSUTI, C. Y.; DEUS, W. B. D. POLUIÇÃO DO AMBIENTE POR METAIS PESADOS E UTILIZAÇÃO DE VEGETAIS COMO BIOINDICADORES. **Acta Biomédica Brasiliensia**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 95, 2018.

TESÁN-ONRUBIA, J. A. *et al.* Bioconcentration, bioaccumulation and biomagnification of mercury in plankton of the Mediterranean Sea. **Marine Pollution Bulletin**, [S.L.], v. 194, p. 115439, set. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115439>.

TORRES, M. A. *et al.* Biochemical biomarkers in algae and marine pollution: A review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, [s. l.], v. 71, n. 1, p. 1–15, 2008.

VALLS, F. C. L. *et al.* An overview of seabirds in the Santos Basin, Brazil: species, threats, and current trends in studies. **Ocean and Coastal Research**, [s. l.], v. 71, n. suppl 3, p. e23011, 2023.

VEGA, C. M. *et al.* Levels of Cadmium, Mercury, and Lead in Magellanic Penguins (*Spheniscus magellanicus*) Stranded on the Brazilian Coast. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, [s. l.], v. 58, n. 2, p. 460–468, 2010.

VILLANUEVA, C.; WALKER, B. G.; BERTELLOTTI, M. A matter of history: effects of tourism on physiology, behaviour and breeding parameters in Magellanic Penguins (*Spheniscus magellanicus*) at two colonies in Argentina. **Journal of Ornithology**, [s. l.], v. 153, n. 1, p. 219–228, 2012.

VIZUETE, J. *et al.* Heavy metals and metalloid levels in the tissues of yellow-legged gulls (*Larus michahellis*) from Spain: sex, age, and geographical location differences. **Environmental Science And Pollution Research**, [S.L.], v. 29, n. 36, p. 54292-54308, 17 mar. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-022-19627-8>.

ZUO, G. *et al.* Present geothermal field of the Santos Basin, Brazil. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 12369, 2023.