

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
CURSO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS - BACHARELADO

**HISTOPATOLOGIA DE BRÂNQUIAS E
FÍGADOS DE *Cynoscion* (Gill, 1861)
(Perciformes: Sciaenidae) COLETADOS NA
REGIÃO COSTEIRA ADJACENTE À FOZ DO
RIO DOCE APÓS O ROMPIMENTO DA
BARRAGEM DE FUNDÃO**

KORINA BLUNK DA SILVA

**São Mateus/ES
Dezembro/2023**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
CURSO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS - BACHARELADO**

**HISTOPATOLOGIA DE BRÂNQUIAS E
FÍGADOS DE *Cynoscion* (Gill, 1861)
(Perciformes: Sciaenidae) COLETADOS NA
REGIÃO COSTEIRA ADJACENTE À FOZ DO
RIO DOCE APÓS O ROMPIMENTO DA
BARRAGEM DE FUNDÃO**

KORINA BLUNK DA SILVA

Monografia de Conclusão de Curso apresentada ao Curso de Ciências Biológicas da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de BACHAREL EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Juliana Castro Monteiro Pirovani
Coorientadora: Msc. Lorena Ziviani Bevitório

**São Mateus/ES
Dezembro/2023**



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: **KORINA BLUNK DA SILVA**

Título:

**HISTOPATOLOGIA DE BRÂNCUIAS E FÍGADOS DE *Cynoscion* (Gill, 1861)
COLETADOS NA REGIÃO COSTEIRA ADJACENTE À FOZ DO RIO DOCE APÓS O
ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO**

Monografia do Curso de Ciências Biológicas (Bacharelado)
Defendida e aprovada em 06/12/2023

Com nota 8,5 (oito e meio) pela comissão julgadora:

Orientador(a) e presidente da Comissão Examinadora
Juliana Castro Monteiro Pirovani (UFES)

Examinador 1
Julia Sacramento Barbosa (FEST)

Examinador 2
Leandro Pirovani de Sant'Ana (FEST)

Coorientador
Lorena Ziviani Bevitório (FEST)

Centro Universitário Norte do Espírito Santo

Rodovia BR 101 Norte, Km. 60, Bairro Litorâneo, CEP 29932-540
São Mateus - ES
Site eletrônico: <http://www.ceunes.ufes.br>

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me iluminado, guiado e sustentado durante esses anos de graduação.

A minha mãe, Neuza Blunk, e toda minha família pelo cuidado e amor de sempre.

A minha amiga-irmã de infância, Clara Beatriz, por toda parceria e apoio, mesmo distante. Nossas conversas dividindo as glórias e dissabores da vida acadêmica sempre significaram muito.

A minha dupla de graduação, Ana Paula, por todas motivações, construção diária de momentos bons e por todo amadurecimento que esses anos de convívio trouxe.

A minha panela de amigos de curso André, Ana Paula, Ana Larissa, Bruna e Luana. Obrigada por toda amizade e apoio. Vocês fizeram com que cada experiência fosse mais rica e significativa.

Aos meus amigos que ganhei durante os anos residindo em São Mateus, vocês enriqueceram minha jornada, e sou grata por cada momento que passamos juntos.

Ao Laboratório de Biologia Estrutural - LABEST pela oportunidade de viver uma das melhores experiências da minha vida acadêmica e pelos ensinamentos.

Aos "bests" do LABEST, com os quais aprendi muito, todas as trocas, conversas, cafezinhos, "whey 's", brincadeiras e trabalhos guardarei para sempre, vocês foram essenciais nessa jornada.

Ao Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática - PMBA pelas oportunidades de trabalhos em campo e aprendizados, sem dúvida uma das melhores experiências da minha graduação.

A minha orientadora, Dra. Juliana Castro pela confiança, por todas as oportunidades, auxílio, conforto nos momentos solicitados e por sempre me fazer acreditar que ia dar certo. Sou grata por tê-la como orientadora em minha jornada acadêmica.

A minha coorientadora, MSc. Lorena Ziviani pela confiança, paciência, pelo acolhimento e disponibilidade de sempre. Jamais esquecerei seus ensinamentos.

A Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, onde encontrei professores excelentes, que me despertaram amor por essa profissão.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelas oportunidades ao longo da graduação.

A todos, meu muito obrigada! Cada um de vocês contribuíram de maneira única para minha jornada e sou eternamente grata.

SUMÁRIO

SUMÁRIO DE FIGURAS.....	V
SUMÁRIO DE TABELAS.....	VII
RESUMO.....	VIII
ABSTRACT	IX
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1.1. FOZ DO RIO DOCE	1
1.2. POLUIÇÃO DE RECURSOS AQUÁTICOS POR METAIS.....	2
1.3. BIOMONITORES.....	5
1.4. GÊNERO <i>CYNOSCION</i>	6
1.5. BIOMARCADORES.....	7
1.6. BRÂNQUIAS	8
1.7. FÍGADO.....	10
2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13
3. OBJETIVOS.....	19
3.1. OBJETIVO GERAL.....	19
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
4. RESULTADOS	19
HISTOPATOLOGIA DE BRÂNQUIAS E FÍGADOS DE <i>CYNOSCION</i> (PERCIFORMES: SCIAENIDAE) COLETADOS NA REGIÃO COSTEIRA ADJACENTE À FOZ DO RIO DOCE APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO.....	20
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	43

SUMÁRIO DE FIGURAS

Figura 1: Representantes do gênero *Cynoscion*. A) Pescadinha-Amarela (*Cynoscion regalis*) (Bloch and Schneider, 1801); B) Pescadinha-da-Foz (*Cynoscion nebulosus*) (Curvier,1830); C) a Pescadinha-de-Pintas (*Cynoscion arenarius*) (Ginsburg,1930).

Fonte: Adaptado de6

Figura 2: Filamento branquial, corte transversal, H&E (barra = 16.7 μm) 1) lamela primária; 2) lamela secundária; 3) célula epitelial; 4) célula mucosa; 5) célula pilar; 6) lúmen capilar (lacuna); 7) eritrócitos na luz do capilar; 8) célula de cloreto. **Fonte:** Adaptado de YONKOS, 2000..... 10

Figura 3: Fígado, corte transversal, H&E (barra = 22.8 μm) 1) hepatócitos; 2) ductos biliares; 3) vasos sinusoides; 4) tecido conectivo; 5) centro de melanomacrófagos; 6) veia porta. **Fonte:** Adaptado de YONKOS, 2000. 11

Figura 4: Mapa da foz do rio Doce, costa norte do Espírito Santo, Sudeste do Brasil. Preto: ponto da região central a boca da foz do rio Doce (Ponto 1); Cinza escuro: pontos da região norte da foz do rio Doce (Ponto 2) e cinza claro: pontos da região sul da foz do rio Doce (Ponto 3). **Fonte:** Adaptado de Barbosa (2021).24

Figura 5: Índice de lesão dos animais coletados em três diferentes regiões adjacentes à foz do rio doce nas estações seca (2021) e chuvosa (2022). Os valores das barras indicam a média e as linhas o desvio padrão. Comparação espacial significativa (triângulos), comparação temporal significativa (bolas).27

Figura 6: Índice de lesão das brânquias coletados em três diferentes regiões adjacentes à foz do rio doce nas estações seca (2021) e chuvosa (2022). Os valores das barras indicam a média e as linhas o desvio padrão. Comparação espacial significativa (triângulos), comparação temporal significativa (bolas).28

Figura 7: Fotomicrografia de brânquias de *Cynoscion* da região marinha adjacente à foz do rio Doce. A: hiperplasia com fusão das lamelas secundárias (asterisco); B:

deslocamento da lamela primária (quadrado); C: hipertrofia (setas finas); D: elevação do epitélio (setas). Coloração: Hematoxilina & Eosina. Barra: A = 20 µm; B, C e D = 50 µm.30

Figura 8: Índice de lesão hepática coletados em três diferentes regiões adjacentes à foz do rio doce nas estações seca (2021) e chuvosa (2022). Os valores das barras indicam a média e as linhas o desvio padrão. Comparação temporal significativa (bolas).31

Figura 9: Fotomicrografia de fígado de *Cynoscion* da região marinha adjacente à foz do rio Doce. A: alteração nuclear (setas); B: necrose (círculo); C: inclusões citoplasmáticas (setas); D: hipertrofia (setas). Coloração: Hematoxilina & Eosina. Barra: A, B, C e D = 50 µm.....33

SUMÁRIO DE TABELAS

Tabela 1: Alterações histopatológicas em peixes. Baseado em Bernet et al. (1999).
.....26

Tabela 2: Frequência (%) das alterações morfológicas nas brânquias de *Cynoscion* coletadas na região costeira adjacente à foz do rio Doce, Linhares/ES.....29

Tabela 3: Frequência (%) das alterações morfológicas no fígado de *Cynoscion* coletados na região costeira adjacente à foz do rio Doce, Linhares/ES.....32

RESUMO

Uma das formas de contenção dos rejeitos em atividades mineradoras é a utilização de barragens de contenção. O rompimento da barragem de Fundão, localizada no distrito de Bento Rodrigues, em Mariana/MG, gerou grandes danos, principalmente, na biota aquática. Estima-se que 43-60 milhões m³ de rejeitos de minério atingiram a bacia do rio Doce, contaminando mais de 600 km carreados pelo rio Doce em direção ao mar. A foz do rio Doce e áreas costeiras adjacentes foram afetadas pela incorporação de diversos metais acima das concentrações permitidas, principalmente de ferro, cromo, manganês, mercúrio e cádmio. O monitoramento ambiental utilizando biomarcadores traz bons resultados, pois fornecem respostas às situações de contaminação. Os peixes são excelentes biomonitores de contaminações no ambiente aquático, por ocuparem o topo da cadeia alimentar, apontando respostas de efeitos cumulativos e persistentes. Diante disso, este estudo analisou as alterações histopatológicas nas brânquias e fígados, órgãos vitais dos peixes, das espécies de peixes do gênero *Cynoscion* coletados na região costeira adjacente à foz do rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão. Nesse sentido, o estudo desses órgãos fornece informações sobre as mudanças ambientais e respostas biológicas que podem representar riscos para populações, comunidades e ecossistemas. As amostras foram coletadas na área marinha adjacente à foz do Rio Doce. Os pontos de coleta neste estudo foram agrupados em três regiões, com base na proximidade em relação à foz, todos localizados na Vila de Regência, Linhares-ES. Estas regiões incluem a área central próxima à boca da foz do rio Doce - ponto 1; a região ao norte da foz - ponto 2; e a região ao sul da foz - ponto 3. O clima desta área é tropical úmido, com chuvas predominantes no verão/primavera e período seco no inverno/outono. Os peixes foram encontrados com auxílio de tarrafas, os exemplares foram anestesiados com benzocaína (1% em água) e, em seguida, dissecados, os órgãos (brânquias e fígados) imersos em solução fixadora. Posteriormente, os fragmentos dos tecidos foram desidratados em concentrações crescentes de álcool, diafanizados em xilol e incluídos em parafina. O material foi seccionado em micrótomo rotativo na espessura de 5 µm e as lâminas coradas com Hematoxilina e Eosina (HE). Os resultados sugerem uma variabilidade espacial e temporal nas lesões das brânquias dos peixes, principalmente durante a estação chuvosa, enquanto as lesões hepáticas não apresentam diferenças espaciais significativas, mas mostraram variações temporais em determinados pontos de coleta durante a estação seca. As alterações histopatológicas neste estudo foram semelhantes entre as estações. As lesões mais frequentes nas brânquias foram: elevação do epitélio, hipertrofia, atrofia das lamelas secundárias, hiperplasia com fusão das lamelas secundárias e deslocamento da lamela primária. Já no fígado foram: hipertrofia, necrose, hemorragia, alterações nucleares e alterações citoplasmáticas. As análises realizadas fornecem diretrizes importantes para a implementação de medidas de proteção e reabilitação da vida aquática na área adjacente à foz do rio Doce.

Palavras-chave: Biomarcador. Contaminação aquática. Morfologia. Pescadinha.

ABSTRACT

One of the ways to contain tailings in mining activities is the use of containment dams. The collapse of the Fundão dam, located in the district of Bento Rodrigues, in Mariana/MG, caused major damage, mainly to the aquatic biota. It is estimated that 43-60 million m³ of ore tailings reached the Doce River basin, contaminating more than 600 km carried by the Doce River towards the sea. The mouth of the Doce River and adjacent coastal areas were affected by the incorporation of several metals above permitted concentrations, mainly iron, chromium, manganese, mercury and cadmium. Environmental monitoring using biomarkers brings good results, as they provide responses to contamination situations. Fish are excellent biomonitors of contamination in the aquatic environment, as they occupy the top of the food chain, indicating responses with cumulative and persistent effects. Therefore, this study analyzed the histopathological changes in the gills and livers, vital organs of fish, of fish species of the genus *Cynoscion* collected in the coastal region adjacent to the mouth of the Doce River after the collapse of the Fundão dam. In this sense, the study of these bodies provides information about environmental changes and biological responses that may pose risks to populations, communities and ecosystems. The samples were collected in the marine area adjacent to the mouth of the Rio Doce. The collection points in this study were grouped into three regions, based on their proximity to the mouth, all located in Vila de Regência, Linhares-ES. These regions include the central area close to the mouth of the Doce River - point 1; the region north of the mouth - point 2; and the region south of the mouth - point 3. The climate in this area is humid tropical, with predominant rain in summer/spring and a dry period in winter/autumn. The fish were found with the aid of nets, the specimens were anesthetized with benzocaine (1% in water) and then dissected, the organs (gills and livers) immersed in a fixative solution. Subsequently, tissue fragments were dehydrated in increasing concentrations of alcohol, cleared in xylene and embedded in paraffin. The material was sectioned on a rotating microtome at a thickness of 5 µm and the slides were stained with Hematoxylin and Eosin (HE). The results suggest spatial and temporal variability in fish gill lesions, mainly during the rainy season, while liver lesions do not present significant spatial differences, but showed temporal variations in certain collection points during the dry season. Histopathological changes in this study were similar between seasons. The most frequent lesions in the gills were: elevation of the epithelium, hypertrophy, atrophy of the secondary lamellae, hyperplasia with fusion of the secondary lamellae and displacement of the primary lamella. In the liver, they were: hypertrophy, necrosis, hemorrhage, nuclear changes and cytoplasmic changes. The analyzes carried out provide important guidelines for implementing measures to protect and rehabilitate aquatic life in the area adjacent to the mouth of the Doce River.

Keywords: Biomarker. Aquatic contamination. Morphology. Fishing.

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1. FOZ DO RIO DOCE

O Rio Doce com cerca de 875 km de extensão, que desemboca no oceano Atlântico, é uma via fluvial de notável importância geográfica, estendendo-se por uma grande área, a qual inclui o estado do Espírito Santo (ANA, 2001). A foz do rio Doce, localizada no município de Linhares, Espírito Santo, é uma região de grande relevância ecológica devido à sua notável variedade de ecossistemas (ALBINO, 1999; PINHEIROS, 2014).

Esta área abriga uma interconexão de paisagens naturais que englobam manguezais (que desempenham um papel fundamental na estabilização da costa, na proteção contra tempestades e na filtragem de nutrientes que fluem do rio para o oceano), estuários e zonas de reprodução de inúmeras espécies de peixes, contribuindo para a sua classificação como um ambiente fundamental para a vida aquática e a biodiversidade local (IPEMA, 2009).

A desembocadura do rio Doce possui características peculiares, incluindo a formação de um submarino delta e um estuário que se estende sobre uma área marinha adjacente, sem a presença de manguezais na sua parte interna (ALBINO 1999; IPEMA, 2009). A influência da água do mar não é significativa devido à intensa vazão do rio (IPEMA, 2009). A deltaica do rio Doce se destaca não apenas pela grande quantidade de sedimentos que transporta, mas também pela sua capacidade de bloquear a deposição de sedimentos pela corrente costeira, resultando na acumulação de sedimentos em sua foz (ALBINO,1999). As praias da região são oceânicas, compostas por areia, e são específicas por serem abertas, com ondas fortes e uma zona de arrebatamento notável na frente da desembocadura do rio, onde ocorrem ondas altas e bancos de areia submersos, alguns dos quais ficam expostos durante maré baixa (ALBINO,1999).

Por conta de sua caracterização, a foz sustenta estoques pesqueiros de elevada importância econômica e social, sendo aproveitada tanto pela pesca artesanal e de pequena escala realizada pelas comunidades locais, quanto por frotas industriais originárias de diversas regiões do Estado, bem como do sul e sudeste do Brasil (IPEMA, 2009; LIMA, 2015).

No entanto, a região da foz do Rio Doce sofreu um grave impacto em novembro de 2015 devido ao rompimento da barragem de Fundão, localizada em Mariana, Minas Gerais. Esse desastre resultou na liberação de uma grande quantidade de rejeitos de mineração, incluindo lama tóxica e sedimentos, que se espalharam ao longo do Rio Doce até atingir o oceano Atlântico (BORGES, 2018). O rompimento da barragem causou danos significativos, principalmente à vida aquática. Após o desastre, os níveis de metais como ferro, chumbo, cobre e cromo na água da bacia excederam os limites estabelecidos pela legislação brasileira (CARVALHO *et al.* 2017). Na foz do rio Doce, ferro, cromo, manganês, mercúrio e cádmio foram encontrados em concentrações acima dos padrões permitidos pela legislação Brasileira (GABRIEL *et al.*, 2020). Além disso, o desastre causou impactos socioeconômicos significativos nas comunidades locais que dependem da pesca e dos recursos naturais da região (POLIGNANO; LEMOS, 2020).

Após o desastre, houve esforços para restaurar e recuperar a área afetada, incluindo ações para minimizar os impactos ambientais, promover a recuperação dos ecossistemas e auxiliar as comunidades afetadas. No entanto, a restauração completa desses ecossistemas pode levar muitos anos, e os danos causados pelo rompimento da barragem destacam a importância da proteção e da gestão sustentável dos recursos naturais em áreas sensíveis como a foz do rio Doce (BORGES, 2018).

1.2. POLUIÇÃO DE RECURSOS AQUÁTICOS POR METAIS

A extração mineral é um setor produtivo fundamental para a economia nacional do Brasil. O país possui vastas reservas de minérios, incluindo minério de ferro, bauxita, alumínio, cobre, nióbio e outros. Esses recursos minerais desempenham um papel crucial na geração de empregos, na arrecadação de impostos e no fornecimento de matérias-primas para diversas indústrias, como a siderúrgica e a de construção civil. A mineração é uma das principais fontes de exportação do Brasil, contribuindo significativamente para a balança comercial do país (ARAÚJO *et al.*, 2014).

Uma parte essencial da indústria de mineração é a construção e operação de barragens de rejeitos. As barragens de rejeitos são estruturas projetadas para conter e armazenar os resíduos resultantes do processo de extração e beneficiamento de minérios (MACHADO, 2007; MELLO & PIASENTIN, 2011). Esses rejeitos, frequentemente, contêm substâncias tóxicas, como metais em altas concentrações (ferro, chumbo, mercúrio, entre outros) e compostos químicos orgânicos utilizados no

processo de beneficiamento. O propósito das barragens de rejeitos é separar e dispor adequadamente esses resíduos, reduzindo os impactos ambientais e garantindo a segurança das comunidades circunvizinhas (PINTO- COELHO, 2015).

Em novembro de 2015, ocorreu um desastre ambiental de grande magnitude relacionado a uma barragem de rejeitos no Brasil. Este desastre teve como epicentro a barragem de Fundão, pertencente à mineradora Samarco, uma *joint venture* entre a Vale e a BHP Billiton. A barragem de Fundão rompeu-se, resultando na liberação catastrófica de uma grande quantidade de rejeitos de mineração (ESPINDOLA *et al.*, 2016). Os rejeitos liberados continham substâncias tóxicas, incluindo metais pesados e compostos químicos orgânicos, que causaram impactos devastadores no meio ambiente e na vida humana (ESPINDOLA *et al.*, 2016; CARVALHO *et al.*, 2017).

Os rejeitos de mineração liberados pela barragem de Fundão provocaram mudanças substanciais nos parâmetros físico-químicos da água do rio Doce (SILVA, 2022). O aumento na carga de sedimentos na água levou a um declínio acentuado do oxigênio dissolvido, um parâmetro crítico para a sobrevivência da fauna aquática. A sedimentação reduziu a penetração da luz solar na coluna d'água, inibindo a fotossíntese das plantas aquáticas e diminuindo a produção de oxigênio por essas plantas. Como resultado, a concentração de oxigênio dissolvido na água diminuiu consideravelmente, prejudicando a respiração de peixes e outros organismos aquáticos. Em áreas mais afetadas, essa baixa oxigenação resultou em eventos de mortandade em massa de peixes e de outros organismos aquáticos (IBAMA, 2015).

Além da turbidez, a presença de metais na água do rio Doce representou uma séria ameaça à fauna aquática e aos ecossistemas aquáticos. Metais como cádmio, chumbo, ferro, alumínio, manganês, cromo, cobre, níquel e mercúrio foram liberados pelos rejeitos e se dispersaram na água (IBAMA, 2015; ANA, 2016; CARVALHO *et al.*, 2017). Esses elementos em altas concentrações são tóxicos e podem causar danos agudos e crônicos às espécies aquáticas. Por exemplo, o cádmio tem um impacto notável principalmente em órgãos como brânquias, fígado e rins (ROGERS, RICHARDS & WOOD, 2003). Sua toxicidade aguda resulta em desequilíbrio na regulação iônica das brânquias e em um aumento nos níveis de cortisol, diminuindo a indução do estresse oxidativo (ROGERS, RICHARDS & WOOD, 2003). Por outro lado, os efeitos tóxicos do chumbo nas brânquias envolvem alterações histológicas, como hiperplasia, fusão das lamelas, elevação do epitélio e aneurisma (MARTINEZ *et al.*,

2004). Além disso, há uma multiplicação das células de cloreto e sua migração nas brânquias (RIBEIRO *et al.*, 2014).

O aumento dos níveis de ferro nos peixes resulta na formação de aglomerados de ferro nas brânquias, levando à obstrução e, conseqüentes, problemas respiratórios (AUTHMAN, 2015; BURY, WALKER & GLOVER, 2003). Além disso, são observadas alterações histopatológicas nas brânquias de peixes, como hiperplasia, elevação do epitélio, fusão lamelar, congestão e aumento das células mucosas. No fígado, ocorre vacuolização intensa, hemorragia e necrose (ABALAKA, 2015; SINGH *et al.*, 2019). O impacto tóxico do alumínio varia de acordo com as características físico-químicas do ambiente, sendo mais prejudicial em ambientes ácidos, o que representa uma ameaça maior para os peixes (EXLEY, CHAPPELL & BIRCHALL, 1991). O efeito do alumínio nas brânquias se traduz em mudanças na estrutura, incluindo fusão das lamelas, bem como alterações fisiológicas, como um aumento na produção excessiva de muco. Essas alterações comprometem o desempenho do órgão, especialmente em relação aos processos de regulação iônica (ABDEL-LATIF, 2008).

O manganês é um elemento comum e essencial para os peixes, desempenhando funções específicas; no entanto, níveis elevados podem prejudicar os organismos aquáticos (Hedayati *et al.*, 2014; Vieira *et al.*, 2012). A toxicidade do manganês pode resultar em estresse oxidativo, evidenciado pelo aumento de catalase, malondialdeído e superóxido dismutase, além de causar alterações histopatológicas nas brânquias, como elevação do epitélio, hiperplasia, fusão lamelar e aneurisma (VIEIRA *et al.*, 2012; HEADAYATI *et al.*, 2014). O cromo se acumula predominantemente em órgãos como brânquias, fígado e rim, impactando as atividades metabólicas e fisiológicas (MISHRA & MOHANTY, 2009). Os efeitos tóxicos englobam a geração de espécies reativas de oxigênio e resultam em alterações histológicas nas brânquias, incluindo hiperplasia, hipertrofia, edema, fusão e necrose lamelar. No fígado, são observadas intensa vacuolização, núcleo picnótico e necrose (MISHRA & MOHANTY, 2009; VELMA & TCHOUNWOU, 2011).

Assim, as alterações nos parâmetros físico-químicos da água, como a redução do oxigênio dissolvido e a acidificação resultante da presença de metais pesados, desempenharam um papel crítico na diminuição da diversidade de espécies e na redução das populações de peixes, invertebrados e outros organismos aquáticos no rio Doce após o desastre da barragem de Fundão. Estas mudanças na qualidade da

água representam um desafio significativo para a restauração dos ecossistemas aquáticos na região afetada (POLIGNANO; LEMOS, 2020).

1.3. BIOMONITORES

Um biomonitor é um organismo, ou uma parte dele, ou até mesmo uma comunidade, que tem a capacidade de fornecer informações quantitativas sobre o ambiente onde está presente (MARKERT; BREURE.; ZECHMEISTER, 2003). Dessa forma, têm aplicação em diversas escalas, desde o nível celular até o ecossistema, facilitando a avaliação da saúde ambiental e fornecendo informações cruciais para analisar os componentes biológicos, físicos e químicos introduzidos no ambiente. Essas mudanças refletem na capacidade individual do organismo, na densidade populacional, na composição da comunidade e no equilíbrio do ecossistema (HOLT; MILLER, 2010).

Nos ecossistemas aquáticos, a posição trófica dos peixes e seu papel nas cadeias alimentares desempenham um papel fundamental na sua utilidade como biomonitores. Nesse sentido, organismos que ocupam o ápice da cadeia alimentar são frequentemente escolhidos para estudos, uma vez que mantêm uma relação intrínseca com toda a cadeia alimentar abaixo deles. Isso permite detectar respostas que englobam efeitos específicos, acumulativos e persistentes em diversos níveis da cadeia alimentar, além de efeitos diretos no indivíduo (LINS *et al.*, 2010).

Há uma quantidade significativa de estudos que destacam os peixes como modelos eficazes para avaliar a condição dos ecossistemas aquáticos (LINS *et al.*, 2010; BEVITORIO *et al.* 2022; MARINO, 2022; LECHINOVSKI, 2023; TESSARO, 2023).

Além disso, os peixes desempenham um papel fundamental na alimentação humana, fornecendo minerais e vitaminas essenciais para o funcionamento adequado das respostas celulares. Com isso, é uma fonte de ácidos graxos que têm efeitos benéficos para a saúde cardiovascular, contribuindo para o controle dos níveis de colesterol no sangue (MADIHA *et al.*, 2022).

O consumo de peixes com níveis elevados de metais pode resultar em alta toxicidade para a saúde humana, afetando o funcionamento de vários órgãos específicos. A exposição a longo prazo a essas substâncias poluentes leva a processos degenerativos, afetando tanto aspectos físicos como teciduais, e levando a problemas neurológicos graves, incluindo doenças como Alzheimer, Parkinson, distrofia muscular e esclerose múltipla (PRASANNAJIT *et al.*, 2023). A toxicidade do

mercúrio, por exemplo, pode resultar em acrodinia ou doença rosa. Além disso, a exposição aguda ao chumbo pode causar hipertensão, disfunção renal, artrite, alucinações e vertigens (MADIHA *et al.*, 2022).

1.4. GÊNERO *CYNOSCION*

Cynoscion (Gill, 1861) refere-se a um gênero de peixes da família Sciaenidae, que são conhecidos popularmente como pescadinhas. Espécies do gênero *Cynoscion* são encontradas em águas salgadas e salobras, como estuários e baías, e são populares entre pescadores comerciais e esportivos devido ao seu valor culinário e capacidade de luta quando fisgadas (BEMVENUTI & FISCHER, 2011).

O gênero *Cynoscion* inclui diversas espécies de pescadinhas que são distribuídas, principalmente, nas águas costeiras do oceano Atlântico, do Golfo do México à América do Sul. Algumas espécies notáveis incluem a Pescadinha-Amarela (*Cynoscion regalis*) (Bloch and Schneider, 1801), a Pescadinha-da-Foz (*Cynoscion nebulosus*) (Curvier, 1830), a Pescadinha-de-Pintas (*Cynoscion arenarius*) (Ginsburg, 1930) e muitas outras. Essas espécies variam em tamanho, coloração e hábitos alimentares (BEMVENUTI & FISCHER, 2011) (Figura 1).

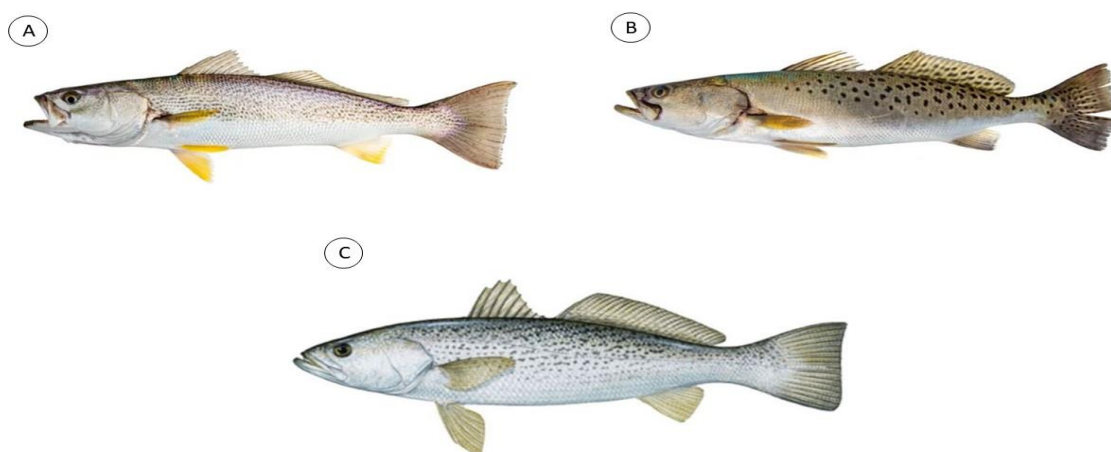


Figura 1: Representantes do gênero *Cynoscion*. A) Pescadinha-Amarela (*Cynoscion regalis*) (Bloch and Schneider, 1801); B) Pescadinha-da-Foz (*Cynoscion nebulosus*) (Curvier, 1830);

C) a Pescadinha-de-Pintas (*Cynoscion arenarius*) (Ginsburg,1930). **Fonte:** Adaptado de BEMVENUTI & FISCHER, 2011.

As pescadinhas geralmente têm corpos alongados e comprimidos lateralmente, com uma coloração que pode variar de prateado a verde-oliva, dependendo da espécie e do ambiente em que vivem (BEMVENUTI & FISCHER, 2011). Elas são conhecidas por sua boca terminal, que é voltada para cima, e pelos dentes afiados que são usados para capturar presas, como peixes menores e crustáceos (BEMVENUTI & FISCHER, 2011)

A posição trófica desse peixe, frequentemente situado em níveis tróficos intermediários da cadeia alimentar aquática, o torna particularmente sensível a alterações na disponibilidade de presas e na qualidade da água (ARIAS, 2007). Como predador de outros organismos aquáticos, a saúde e a abundância do *Cynoscion* refletem a saúde geral do ecossistema aquático. Quando há variações significativas na população pode indicar desequilíbrios na cadeia alimentar e problemas ambientais mais amplos (BEMVENUTI & FISCHER, 2011).

1.5. BIOMARCADORES

A identificação e caracterização de biomarcadores têm desempenhado um papel fundamental na área das Ciências Biológicas, estabelecendo uma ponte crucial entre a pesquisa básica e sua aplicação prática. Biomarcador é uma substância, molécula ou processo biológico mensurável que fornece informações relevantes sobre o estado funcional de um organismo ou sistema biológico (AMORIM, 2003). Nesse contexto, os biomarcadores desempenham um papel crucial, permitindo a detecção sensível de exposições ambientais, bem como a avaliação dos efeitos adversos resultantes. Eles não apenas fornecem informações quantitativas sobre a extensão da exposição a agentes nocivos, mas também podem revelar o potencial de danos e auxiliar na identificação de grupos suscetíveis, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias de mitigação e regulamentação ambiental (ARIAS, 2007).

A histopatologia é destacada como biomarcador devido à sua posição dentro dos níveis de organização biológica. Mudanças histopatológicas resultam de uma variedade de transformações bioquímicas e fisiológicas no organismo, podendo culminar na formação de lesões em células, tecidos ou órgãos (Hinton & Laurén, 1990; Hinton et al., 1992). No caso dos tecidos de peixes, as alterações histopatológicas

servem como biomarcadores dos efeitos da exposição a estressores ambientais. Essa categoria de biomarcadores possibilita uma análise específica dos órgãos e das células-alvo, revelando como são afetadas. Além disso, em avaliações de campo, a histopatologia mostra um método eficaz para identificar os diversos efeitos da exposição aguda ou crônica em diferentes tecidos e órgãos (HINTON *et al.*, 1992).

1.6. BRÂNQUIAS

As brânquias são estruturas complexas e altamente especializadas encontradas em muitos organismos aquáticos, especialmente peixes (Figura 2). Elas estão localizadas na região lateral da cabeça, protegidas por uma cobertura óssea ou cartilaginosa chamada opérculo. Cada brânquia é composta por uma série de estruturas, incluindo filamentos branquiais e lamelas. A função principal das brânquias é permitir que os peixes retirem oxigênio dissolvido na água, que é essencial para a respiração. À medida que a água flui sobre as brânquias, os filamentos branquiais capturam o oxigênio presente nela (CINAR *et al.*, 2009).

Os filamentos branquiais são projeções e estão dispostos em uma série de arcos branquiais. Cada filamento é coberto por uma membrana chamada epitélio branquial, que é altamente vascularizada, ou seja, repleta de pequenos vasos sanguíneos (FILHO *et al.*, 2014). Quanto ao filamento em si, cada um possui duas artérias que se conectam nas lamelas envolvidas na mesma etapa respiratória, o vaso aferente leva o sangue por toda a fibra e o eferente fica encarregado de garantir que o líquido viscoso retorne oxigenado (WILSON & LAURENT, 2002). Essa vascularização é fundamental para a função das brânquias, pois permite a troca eficiente de gases entre o sangue do peixe e a água circundante (WILSON & LAURENT, 2002).

Na lamela secundária, há apenas duas camadas de células epiteliais que estão organizadas na membrana basal e são sustentadas por células colunares que isolam os capilares lamelares (MELETTI, 2003). Células de cloreto, células mucosas, melanócitos, macrófagos e linfócitos podem ser identificados nos filamentos branquiais (FILHO *et al.*, 2014). Destaca-se que as células mucosas estão predominantemente localizadas na base dos filamentos e entre as lamelas. Elas produzem muco, desempenhando funções de lubrificação, proteção contra microrganismos e resistência a doenças e substâncias tóxicas (BERNET *et al.*, 1999).

Ao mesmo tempo, essas estruturas eliminam dióxido de carbono e outros resíduos metabólicos produzidos pelo organismo na forma de amônia (BEMVENUTI & FISCHER, 2011). Isso ocorre devido à diferença nas concentrações de oxigênio e dióxido de carbono entre o sangue dos peixes e a água circundante. Através de um processo de difusão, o oxigênio é transportado dos filamentos branquiais para o sistema circulatório do peixe, enquanto o dióxido de carbono é liberado na água (BEMVENUTI & FISCHER, 2011).

Além de sua função respiratória, as brânquias também estão envolvidas na manutenção do equilíbrio de íons no corpo do peixe (BEMVENUTI & FISCHER, 2011), processo vital para a homeostase dos peixes. Os peixes precisam regular ativamente os níveis de íons como sódio (Na^+), potássio (K^+), cloreto (Cl^-), e cálcio (Ca^{2+}). Isso é crucial para diversas funções fisiológicas, incluindo a osmorregulação, que envolve o controle da concentração de solutos e da quantidade de água dentro do corpo do peixe. Essa capacidade de regulação iônica é um dos muitos motivos pelos quais as brânquias são estruturas vitais em organismos aquáticos, e também sensíveis a mudanças no ambiente que podem afetar essa regulação, como a exposição a substâncias tóxicas, o que a torna um biomarcador valioso em estudos ambientais (BEMVENUTI & FISCHER, 2011).

Devido ao seu contato direto com a água e os poluentes, as brânquias desempenham diversas funções e são o principal alvo de substâncias químicas quando as condições ambientais se tornam desfavoráveis (POLEKSIC e MITROVIC - TUTUNDZIC, 1994; BERNET *et al.*, 1999).

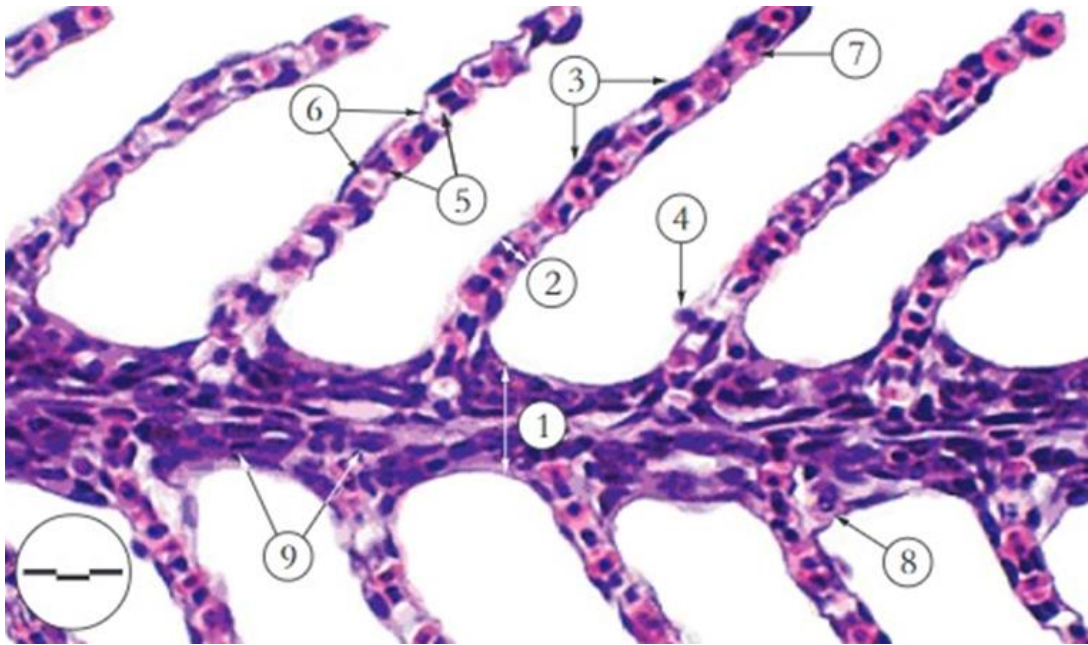


Figura 2: Filamento branquial, corte transversal, H&E (barra = 16.7 μm) 1) lamela primária; 2) lamela secundária; 3) célula epitelial; 4) célula mucosa; 5) célula pilar; 6) lúmen capilar (lacuna); 7) eritrócitos na luz do capilar; 8) célula de cloreto. **Fonte:** Adaptado de YONKOS, 2000.

1.7. FÍGADO

A maioria dos peixes teleósteos apresenta um fígado composto por dois lobos: o lobo direito, situado ao lado da vesícula biliar, e o lobo esquerdo, que se encontra próximo ao baço (TAKASHIMA & HIBIYA, 1995). O fígado é considerado um órgão acessório ao sistema digestivo e é constituído por parênquima celular e fibras que oferecem suporte estrutural. Sua superfície é envolta por uma membrana serosa, e o tecido conjuntivo da cápsula se estende para dentro do parênquima hepático (GIULIO & HINTON, 2008). As principais células que compõem o fígado incluem hepatócitos, células epiteliais dos ductos biliares, macrófagos, células sanguíneas e células endoteliais (Figura 3) (TAKASHIMA & HIBIYA, 1995).

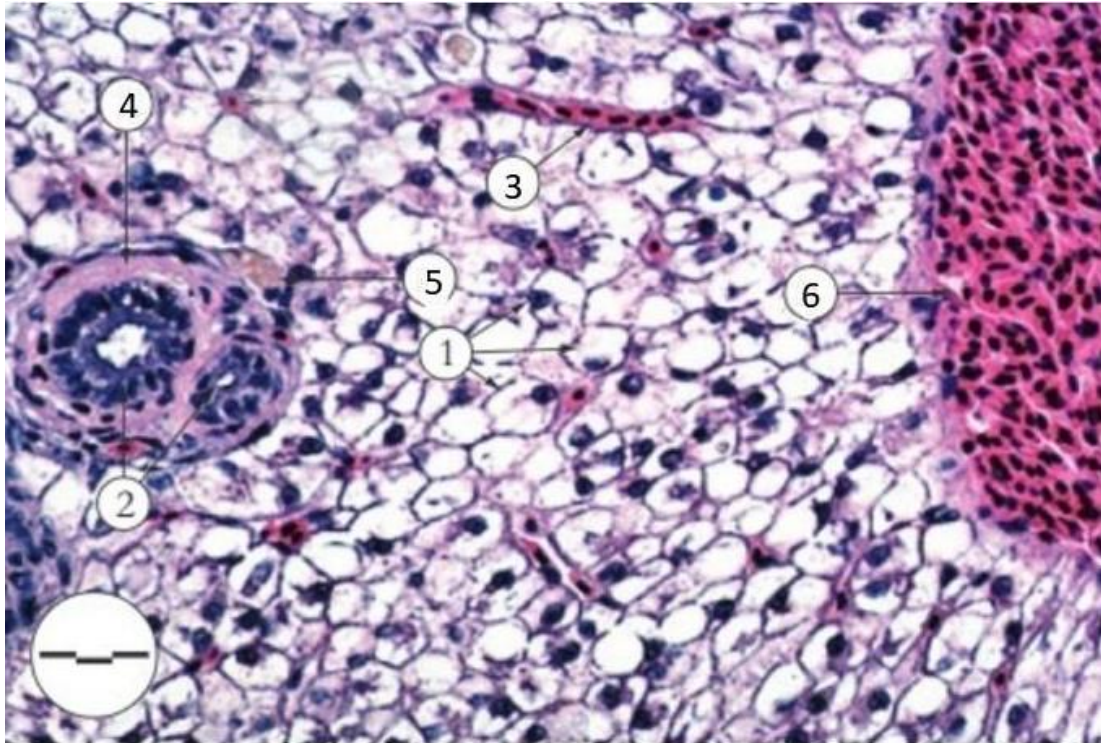


Figura 3: Fígado, corte transversal, H&E (barra = 22.8 μ m) 1) hepatócitos; 2) ductos biliares; 3) vasos sinusoides; 4) tecido conectivo; 5) centro de melanomacrófagos; 6) veia porta. **Fonte:** Adaptado de YONKOS, 2000.

O fígado desempenha um papel crucial nos processos metabólicos relacionados às proteínas e aos lipídios, na produção e liberação de bile, no armazenamento e produção de glicose, na síntese de proteínas plasmáticas e colesterol, na regulação do metabolismo hormonal e na conversão, armazenamento e eliminação de substâncias contaminantes (HEATH, 1995). É um órgão vital para a desintoxicação e eliminação de substâncias tóxicas em peixes, sendo o principal órgão responsável pela transformação de xenobióticos e, possivelmente, pela excreção de metais (HEATH, 1987).

A biotransformação pode ser descrita como a modificação de xenobióticos, catalisada por enzimas, para convertê-los em formas mais prontamente excretáveis pelo organismo (Van Der Oost R. *et al.* 2003). Esse processo, geralmente, ocorre em duas fases distintas. Na primeira fase, ocorre a incorporação de um grupo polar na molécula, tornando-a mais solúvel e propícia para reações subsequentes na fase II. Na segunda fase, o composto já alterado é conjugado com um substrato endógeno, resultando na produção de um produto solúvel em água, o que facilita a sua eliminação (HODGSON & GOLDSTEIN, 2001).

Nesse sentido, a histopatologia do fígado e das brânquias dos peixes *Cynoscion* coletados na região costeira adjacente à foz do rio Doce foram avaliados por serem órgãos sensíveis à contaminação ambiental, já que respondem à exposições agudas e crônicas de metais pesados e substâncias orgânicas tóxicas, fornecendo, assim, informações cruciais sobre os impactos adversos de poluentes na saúde dos peixes e no equilíbrio dos ecossistemas aquáticos.

2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARIAS, Ana Rosa Linde et al. **Utilização de bioindicadores na avaliação de impacto e no monitoramento da contaminação de rios e córregos por agrotóxicos.** Ciência & Saúde Coletiva, v. 12, n. 1, p. 61-72, 2007.

AMORIM, L. C. A. **Os biomarcadores e sua aplicação na avaliação da exposição aos agentes químicos ambientais.** Revista Brasileira de Epidemiologia, v. 6, n. 2, p. 158-170, jun. 2003.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Bacias Hidrográficas do Atlântico Sul – Trecho Leste: sinopse de informações do Rio de Janeiro, Espírito Santo, Bahia e Sergipe.** Brasília: ANA, (Série: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos – Documentos), 2001.

ALBINO, J. **Morfodinâmica e processo de sedimentação atual das praias de Bicanga à Povoação, ES.** Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar), Universidade de São Paulo, 1999.

ARAUJO, E. R.; OLIVIERI, R. D.; FERNANDES, F. R. C. **Atividade mineradora gera riqueza e impactos negativos nas comunidades e no meio ambiente.** In: Recursos minerais e comunidade: impactos humanos, socioambientais e econômicos. 2014. p. 1-12. Rio de Janeiro, CETEM/MCTI.

AUTHMAN, M.M., 2015. **Use of Fish as Bio-indicator of the Effects of Heavy Metals Pollution.** J. Aquac. Res. Dev. 06. <https://doi.org/10.4172/2155-9546.1000328>

ABALAKA, S. E. **Heavy metals bioaccumulation and histopathological changes in Auchenoglanis occidentalis fish from Tiga dam, Nigeria.** Journal of Environmental Health Science and Engineering, v. 13, n. 1, p. 67, 6 dez. 2015.

ABDEL-LATIF, H. A. **The Influence of Calcium and Sodium on Aluminum Toxicity in Nile Tilapia (Oreochromis niloticus).** Australian Journal of Basic and Applied Sciences, p. 747-751, 2008.

BORGES, Sérgio. **O desastre da barragem de rejeitos em Mariana, Minas Gerais: aspectos socioambientais e de gestão na exploração de recursos minerais.** Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía, v. 27, n. 2, p. 301-312, 2018.

BEMVENUTI, Marlise de Azevedo; FISCHER, Luciano Gomes. **PEIXES: MORFOLOGIA E ADAPTAÇÕES**. Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Instituto de Oceanografia.

BURY, N. R.; WALKER, P. A.; GLOVER, C. N. **Nutritive metal uptake in teleost fish. Journal of Experimental Biology**, v. 206, n. 1, p. 11 23, 2003.

BEVITÓRIO L. Z. SILVA N. G., PIROVANI J. C. M., MARQUES J. A. VIEIRA C. E. D., ZEBRAL Y. D., DAMASCENO E. M., LOPES L. L. R. SANT'ANA L. P., MARUBE L., COSTA S. R., MARTINS C. M. G. SANDRINI J. Z. SOUZA M. M. BIANCHINI A., VALE-OLIVEIRA M. **Impacts of tailings of Fundao dam (Brazil) rupture on marine fish: Metals bioaccumulation and physiological responses. Marine Pollution Bulletin** 2022; 177 :113511. PMID: 35303634DOI: 10.1016/j.marpolbul.2022.113511

CARVALHO, M. S.; RIBEIRO, K. D.; MOREIRA, R. M.; DE ALMEIDA, A. M. 2017. **Concentration of metals in the Doce river in Mariana, Minas Gerais, Brazil. Acta Brasiliensis**, v. 1, n. 3, p. 37-41. Cinar K, Aksoy A, Emre Y, Aşti R N, (2009) **The histology and histochemical aspects of gills of the flower fish, Pseudophoxinus antalyae. Vet Res Commun** 33:453–460.

ESPINDOLA, H.S., Campos, R.B.F., Lamounier, K.C.C., Silva, R.S., 2016. **Desastre da Samarco no Brasil: desafios para a conservação da biodiversidade. Front. J. Soc. Technol. Environ. Sci.** 5, 72. <https://doi.org/10.21664/2238-8869.2016v5i3.p72-100>

EXLEY, C.; CHAPPELL, J. S.; BIRCHALL, J. D. **A mechanism for acute aluminium toxicity in fish. Journal of Theoretical Biology**, v. 151, n. 3, p. 417 428, ago. 1991.

FILHO, M.S.; ANDREWS, E.; MOREIRA, L.; BARRETTO V.; MORAES B.; PRESSINOTTI, L. **Avaliação de biomarcadores histológicos em peixes coletados a montante e a jusante da mancha urbana. Atas de saúde ambiental.** v. 2. n.1, 2014.

GABRIEL, F. A.; SILVA, A. G.; QUEIROZ, H. M.; FERREIRA, T. O.; HAUSER-DAVIS, R. A.; & BERNARDINO, A. F. **Ecological risks of metal and 47 metalloid contamination in the Rio Doce estuary. Integrated environmental assessment and management**, v. 16, n. 5, p. 655-660, 2020.

GIULIO, R. T. and D. E. Hinton (2008). "The toxicology of fishes. CRC Press. Taylor and Francis Group."

HEDAYATI, A.; HOSEINI, S. M.; GHELICHPOUR, M. **Acute toxicity of waterborne manganese to *Rutilus caspicus* (Yakovlev, 1870) gill histopathology, immune indices, oxidative condition, and saltwater resistance.** Toxicological & Environmental Chemistry, v. 96, n. 10, p. 1535-1545, 26 nov. 2014.

Heath, A. G. (1995). **Water Pollution and Fish Physiology.** Flórida.

Heath, A. G. (1987). **Water Pollution and Fish Physiology.** Florida -USA.

Hodgson, E. and J. A. Goldstein (2001). **Metabolism of toxicants: phase I reactions and pharmacogenetics.** n: HODGSON, E. & SMART, R.C. (eds) Introduction to biochemical toxicology. . New York, Wiley-Interscience.

HOLT, E.A.; MILLER, S.W. **Bioindicators: using organisms to measure environmental impacts.** Nature Education Knowledge 3(10):8, 2010.

HINTON, D. E.; LAURÉN, D. J. **Integrative histopathological approaches to detecting effects of environmental stressors on fishes.** American Fisheries Society Symposium, n. 8, p. 51-66, 1990.

HINTON, D. E.; BAUMANN, P. C.; GARDNER, G. R.; HAWKINS, W. E.; HENDRICKS, J. D.; MURCHELANO, R. A.; OKIHIRO, M. S. Histopathologic Biomarkers. In: HUGGETT R. J.; KIMERLI, R. A.; MEHRLE Jr, P. M.; BERGMAN, H. L. **Biomarkers biochemical, physiological and histological markers of anthropogenic stress.** Boca Raton: Lewis Publishers, 1992. cap. 4, p. 155–196.

IPEMA. Instituto de Pesquisa da Mata Atlântica. **Contribuição ao processo de criação da Reserva de Desenvolvimento Sustentável da Foz do Rio Doce,** 2009.

IBAMA, I. B. D. M. A. E. R. N. R. **Laudo técnico preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Maria-na, Minas Gerais.** p. 1-38, 2015.

LIMA, H. S. **Qualidade das águas superficiais da porção mineira da Bacia do rio Doce e sua relação com aspectos socioambientais.** Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

LINS, J.A.P.N.; KIRSCHNIK, P.G.; QUEIROZ, V.S.; CIRIO, S.M. **Uso de peixes como biomarcadores para monitoramento ambiental aquático.** Rev. Acad. Ciên. Agrár. Ambient. 2010, 8, 469–484.

LECHINOVSKI, Larissa. **Avaliação dos efeitos toxicológicos de micropartículas provenientes de máscaras descartáveis no organismo-teste Oreochromis niloticus**. 2023. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2023.

MACHADO, W.G. DE F. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração**. Tese (Doutorado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MELLO, F. M.; PIASENTIN, C. **A história das barragens no Brasil**. In: CBDB ed. Rio de Janeiro: [s.n.]. p. 524.2011.

MARTINEZ, C. B. R. et al. **Acute morphological and physiological effects of lead in the neotropical fish Prochilodus lineatus**. Brazilian Journal of Biology, v. 64, n. 4, p. 797 nov. 2004.

MISHRA, A. K.; MOHANTY, B. **Chronic exposure to sublethal hexavalent chromium affects 41 organ histopathology and serum cortisol profile of a teleost, Channa punctatus (Bloch)**. Science of The Total Environment, v. 407, n. 18, p. 5031 5038, set. 2009.

MELETTI, P. C. **Avaliação da degradação ambiental por meio de testes de toxicidade com sedimento e de análises histopatológicas em peixes**. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

MADIHA, Z.; RASHID, Y.; AYESHA, A.; YASIR, S.; LIAQAT, A.; MAHPARA, F.; KHALID, A.K.; SHUANGFEI, L. **Health and environmental effects of heavy metals**. Journal of King Saud University Science, v.34, n.1, p.2-6, 2022.

MARINO, R. V. **Avaliação de múltiplos parâmetros em zebrafish (Danio rerio) para a toxicidade de retardantes de chama: alterações no desenvolvimento e alterações neurocomportamentais**. 2022. 76f. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Ribeirão Preto – Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2022.

MARKERT, B. A.; BREURE, A. M.; ZECHMEISTER, H. G. **Definitions, strategies and principles for bioindication/biomonitoring of the environment**. In: Trace Metals and other Contaminants in the Environment. Elsevier, 2003. p. 3-39.

POLIGNANO, Marcus Vinicius; LEMOS, Rodrigo Silva. **Rompimento da barragem da Vale em Brumadinho: impactos socioambientais na Bacia do Rio Paraopeba**. Ciência e Cultura, São Paulo, v. 72, n. 2, Abr./Jun 2020.

PINHEIRO, F.C.F. **Padrões de uso de habitat do boto-cinza (*Sotalia guianensis*) na região da foz do rio Doce, costa norte do Espírito Santo, Sudeste do Brasil.** Dissertação (Mestrado em Biologia Animal), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

PINTO-COELHO, R. M.. **Existe governança das águas no Brasil? Estudo de caso: O rompimento da Barragem de Fundão, Mariana (MG).** 2015. Belo Horizonte: Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico, v. 24, n° 1/2, p.16-43, 2015.

POLEKSCI, V., Mitrovic-Tutundzic, V., 1994. **Fish gills as a monitor of sublethal and chronic effects of pollution.** In: Sublethal and Chronic Effects of Pollutants on Freshwater Fish. Sublethal Chronic Eff. Pollut. Freshw. Fish 339 352.

PRASANNAJIT, A.; PRADIPTA, R.; MUDULI, A.; MIRA, D. **Assessment of heavy metal accumulation in *Penaeus monodon* and its human health implications.** Marine Pollution Bulletin, v.188, n.1, p.114632-1146351, 2023.

ROGERS, J. .; RICHARDS, J. .; WOOD, C. . **Ionoregulatory disruption as the acute toxic mechanism for lead in the rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*).** Aquatic Toxicology, v. 64, n. 2, p. 215- 234, jul. 2003.

RIBEIRO, A. M. et al. **Lead accumulation and its effects on the branchial physiology of *Prochilodus lineatus*.** Fish Physiology and Biochemistry, v. 40, n. 3, p. 645 657, 2014.

SILVA, Fabio Leandro da; CUNHA-SANTINO, Marcela Bianchessi; FUSHITA, Ângela Terumi; MININEL, Vivian Aline; BIANCHINI JR, Irineu. **Relações entre saúde e ambiente: potenciais impactos decorrentes do rompimento de barragens de rejeitos – uma revisão da literatura nos casos de Mariana e Brumadinho, MG.** Desenvolvimento e Meio Ambiente, Paraná, v. 59, p. 94-109, jan./jun. 2022.

SILVA, Mariza Ferreira da. **Análise espacial dos impactos socioambientais provocados pelo rompimento de duas barragens de rejeitos de mineração: Fundão, na cidade de Mariana e Córrego do Feijão, no município de Brumadinho (Minas Gerais – Brasil).** Territorium, n. 28 (I), 2021.

SINGH, M. et al. **Iron mediated hematological, oxidative and histological alterations in freshwater fish *Labeo rohita*.** Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 170, p. 87 97, abr. 2019.

TAKASHIMA, F. and T. Hibiya (1995). **An atlas of fish histology**. Normal and pathological features.

TESSARO, I. **Estudo dos efeitos toxicológicos de contaminantes emergentes em *Daphnia similis* associando microplásticos de polietileno ao agroquímico imidacloprido**. 2023. 110 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2023.

VIEIRA, M. C. et al. **Acute toxicity of manganese in goldfish *Carassius auratus* is associated with oxidative stress and organ specific antioxidant responses**. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 78, p. 212- 217, abr. 2012.

VELMA, V.; TCHOUNWOU, P. B. **Hexavalent chromium-induced multiple biomarker responses in liver and kidney of goldfish, *Carassius auratus***. *Environmental Toxicology*, v. 26, n. 6, p. 649 656, nov. 2011.

VAN DER OOST, R.; BEYER, J.; VERMEULEN, N. P. E. **Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: a review**. *Environmental Toxicology and Pharmacology* , v. 13, p. 57-149. 2003.

WILSON, J. M., & LAURENT, P. (2002). **Fish gill morphology: inside out**. *The Journal of experimental zoology*, 293(3), 192–213. <https://doi.org/10.1002/jez.10124>.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar as alterações morfológicas nas brânquias e fígado de espécies de peixes marinhos pertencentes ao gênero *Cynoscion*, coletadas em diferentes pontos na região costeira adjacente à foz do rio Doce em Linhares, Espírito Santo, após o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar as lesões nas brânquias e fígado dos exemplares de *Cynoscion*;
- Calcular os índices de lesão de cada órgão analisado, bem como o índice de lesão do animal;
- Comparar os índices de lesão dos exemplares de *Cynoscion* coletados em diferentes estações - avaliação temporal;
- Comparar os índices de lesão dos exemplares de *Cynoscion* coletados em três diferentes regiões adjacentes à foz do rio Doce, Linhares, ES – avaliação espacial.

4. RESULTADOS

Os resultados serão apresentados no manuscrito intitulado como "HISTOPATOLOGIA DE BRÂNQUIAS E FÍGADOS DE *Cynoscion* (Perciformes: Sciaenidae) COLETADOS NA REGIÃO COSTEIRA ADJACENTE À FOZ DO RIO DOCE APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO.

HISTOPATOLOGIA DE BRÂNQUIAS E FÍGADOS DE *Cynoscion* (Perciformes: Sciaenidae) COLETADOS NA REGIÃO COSTEIRA ADJACENTE À FOZ DO RIO DOCE APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO.

Korina Blunk da Silva¹, Lorena Ziviani Bevitório², Juliana Castro Monteiro Pirovani¹

¹ Departamento de Ciências Agrárias e Biológicas, Universidade Federal do Espírito Santo- CEUNES/UFES. Rod. Governador Mário Covas, Km 60, Litorâneo, São Mateus, ES, 29932-540.

² Fundação Espírito-Santense de Tecnologia, Vitória FEST. Av. Fernando Ferrari, 845, Goiabeiras, Vitória-ES, 29075-090.

RESUMO

A remoção e processamento de recursos minerais, uma atividade ancestral crucial para o desenvolvimento humano, gera preocupações ambientais significativas devido aos impactos negativos, como desmatamento, erosão, poluição e geração de resíduos, incluindo metais tóxicos. As barragens de contenção, uma estratégia para gerenciar esses resíduos, podem representar ameaças se forem mal elaboradas ou se houver negligência nas vistorias, como o que aconteceu com o desastre da barragem de Fundão, em Mariana/MG, em 2015. O rompimento da barragem ocasionou danos graves, especialmente na vida aquática. Isso levou ao aumento nos níveis de metais tóxicos, como ferro, chumbo, cobre e cromo, em toda a bacia hidrográfica, ultrapassando os limites legais. Na foz do rio Doce, em Linhares/ES, os níveis de metais, incluindo ferro, cromo, manganês, mercúrio e cádmio, também excederam as normas permitidas. O uso de peixes como biomonitores tem mostrado resultados consistentes na avaliação da qualidade da água em ecossistemas aquáticos. Eles ocupam o topo da cadeia alimentar e, portanto, fornecem respostas abrangentes aos impactos ambientais adversos, particularmente por meio de alterações histopatológicas observadas nos órgãos, como brânquias e fígado. As amostras foram coletadas na área marinha adjacente à foz do Rio Doce. Os pontos de coleta neste estudo foram agrupados em três regiões, com base na proximidade em relação à foz, todos localizados na Vila de Regência, Linhares-ES. Estas regiões incluem a área central próxima à boca da foz do rio Doce - ponto 1; a região ao norte da foz - ponto 2; e a região ao sul da foz - ponto 3. O clima desta área é tropical úmido, com chuvas predominantes no verão/primavera e período seco no inverno/outono. Os peixes foram encontrados com auxílio de tarrafas, os exemplares foram anestesiados com benzocaína (1% em água) e, em seguida, dissecados, os órgãos (brânquias e fígados) imersos em solução fixadora. Posteriormente, os fragmentos dos tecidos foram desidratados em concentrações crescentes de álcool, diafanizados em xilol e incluídos em parafina. O material foi seccionado em micrótomo rotativo na espessura de 5 µm e as lâminas coradas com Hematoxilina e Eosina (HE). Os resultados sugerem uma variabilidade espacial e temporal nas lesões das brânquias dos peixes, principalmente durante a estação chuvosa, enquanto as lesões hepáticas não apresentam diferenças espaciais significativas, mas mostraram variações temporais

em determinados pontos de coleta durante a estação seca. Essas avaliações podem orientar medidas de proteção e recuperação da vida aquática na região da foz do Rio Doce.

Palavras-chave: Biomarcador. Contaminação aquática. Morfologia. Pescadinha.

INTRODUÇÃO

A extração e o processamento de recursos minerais representam uma das atividades mais antigas da humanidade, desempenhando um papel crucial no desenvolvimento das civilizações. Além disso, esse setor se destaca pelo seu potencial econômico lucrativo. No entanto, a complexa relação entre os resíduos resultantes dessas operações e a busca pelo desenvolvimento sustentável suscita preocupações significativas de natureza socioambiental em relação à exploração de recursos naturais. As atividades de mineração têm um impacto substancial no ambiente físico, resultando em desmatamento, erosão do solo, poluição da água, transformações na paisagem e no terreno, além da geração de rejeitos contendo metais (ARAÚJO *et al.*, 2014).

Uma das estratégias para conter os resíduos gerados em operações de mineração é a construção de barragens de contenção. No entanto, quando essas estruturas são projetadas ou mantidas de maneira inadequada, ou mesmo quando há falhas de manutenção, isso pode resultar no colapso da barragem, tornando-se uma ameaça significativa tanto para o ambiente quanto para a biota. Um exemplo notório desse risco ocorreu com a tragédia da barragem de Fundão, pertencente ao complexo de mineração sob a gestão da empresa Samarco Mineração S/A, localizada no distrito de Bento Rodrigues, em Mariana, Minas Gerais. Em 5 de novembro de 2015, essa barragem sofreu um rompimento catastrófico. Como consequência, uma área de aproximadamente 1.600 hectares foi inundada por uma mistura de lama proveniente do processamento de minérios de ferro. Alguns dias depois, essa lama alcançou o oceano Atlântico, via rio Doce (PINTO-COELHO, 2015).

O rompimento da barragem causou danos significativos, principalmente no que se refere à vida aquática. Após o incidente, foi observado aumento nos níveis de metais como ferro, chumbo, cobre e cromo na água de toda a bacia, ultrapassando os limites estabelecidos pela legislação brasileira (CARVALHO *et al.*, 2017). Na foz do rio Doce, localizada na Vila de Regência, em Linhares, Espírito Santo, foram

registradas concentrações de metais acima dos níveis permitidos, tais como ferro, cromo, manganês, mercúrio e cádmio (GABRIEL *et al.*, 2020).

O uso de biomonitores para o monitoramento ambiental tem-se mostrado eficaz, uma vez que fornecem respostas às situações de contaminação. Os peixes são particularmente eficazes como biomonitores da qualidade da água em ecossistemas aquáticos, uma vez que ocupam o topo da cadeia alimentar. Conseqüentemente, eles controlam relações diretas com níveis inferiores da cadeia trófica, o que lhes permite oferecer respostas que abrangem efeitos extremos, cumulativos e persistentes em diversos níveis tróficos (LINS *et al.*, 2010). Nesse sentido, as alterações histopatológicas observadas nos tecidos dos peixes mostram-se como excelentes biomarcadores de impactos resultantes da exposição a fatores ambientais adversos. Os órgãos frequentemente avaliados em estudos de biomonitoramento são as brânquias e o fígado.

As brânquias são estruturas ricamente vascularizadas onde ocorrem as trocas do dióxido de carbono e oxigênio. O processo consiste no fluxo em que a água ingerida via bucal segue em direção aos filamentos branquiais, que contam com projeções nomeadas como lamelas secundárias, responsáveis por realizar as trocas gasosas. Na lamela secundária, há apenas duas camadas de células epiteliais que estão organizadas na membrana basal e são sustentadas por células colunares que isolam os capilares lamelares (MELETTI, 2003). Células de cloreto, células mucosas, melanócitos, macrófagos e linfócitos podem ser identificados nos filamentos branquiais (FILHO *et al.* 2014). Quanto ao filamento em si, cada um possui duas artérias que se conectam nas lamelas envolvidas na mesma etapa respiratória, o vaso aferente leva o sangue por toda a fibra e o eferente fica encarregado de garantir que o líquido viscoso retorne oxigenado (WILSON & LAURENT, 2002).

De acordo com Bernet *et al.* (1999), a poluição da água induz alterações patológicas nos peixes. Hiperplasia, fusão lamelar, hipertrofia, necrose, aneurisma, proliferação de células de muco e de cloreto são apontadas como as mais recorrentes nas brânquias.

O fígado do peixe conta com os mesmos mecanismos circulatórios, onde o sangue é fornecido por artérias hepáticas e pela veia porta (o vaso sanguíneo que leva sangue dos intestinos) e drenado pelas veias hepáticas. A maioria dos peixes possuem apenas um lobo no fígado de forma que sua vasculatura se divide em outras duas grandes regiões circulatórias (GINGERICH, 1982). Microscopicamente, o fígado

é formado por placas celulares circundadas por sinusóide em torno da veia centro lobular, e cada placa apresenta hepatócitos com uma face sinusoidal para absorção e uma face biliar para excreção (BRUSLE & ANADON, 1996). Os hepatócitos possuem um núcleo arredondado com cromatina nas periferias e dispersa e nucléolo é proeminente.

Quanto ao objetivo principal, o foco é avaliar as alterações morfológicas nas brânquias e fígado de espécies de peixes marinhos pertencentes ao gênero *Cynoscion*, popularmente conhecida como pescadinha, coletadas em diferentes pontos na região costeira adjacente à foz do rio Doce em Linhares, Espírito Santo, após o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais e objetivos específicos:

- Identificar as lesões nas brânquias e fígado dos exemplares de *Cynoscion*
- Calcular os índices de lesão de cada órgão analisado, bem como o índice de lesão do animal.
- Comparar os índices de lesão dos exemplares de *Cynoscion* coletados em diferentes estações - avaliação temporal.
- Comparar os índices de lesão dos exemplares de *Cynoscion* coletados em três diferentes regiões adjacentes à foz do rio Doce, Linhares, ES – avaliação espacial.

Assim, é importante que se avalie o efeito dos metais presentes na foz do rio Doce na morfologia das brânquias e fígados, órgãos indicadores de exposição aguda e crônica, respectivamente, aos contaminantes ambientais. Os resultados obtidos a partir do monitoramento ambiental podem ter implicações significativas no apoio e direcionamento das ações destinadas à recuperação e proteção da vida aquática na bacia do rio Doce e da região costeira adjacente à sua foz. O presente estudo avaliou a histopatologia das brânquias e fígado de *Cynoscion* coletadas na região costeira adjacente à foz do rio Doce, em Linhares/Espírito Santo, durante as estações seca e chuvosa, após o rompimento da barragem de rejeito de Fundão.

METODOLOGIA

As coletas foram realizadas na região costeira adjacente à foz do rio Doce (Latitude: 7828234,12; Longitude: 414079,86), região setentrional do Espírito Santo, no litoral do sudeste do Brasil. Os pontos de coleta foram organizados em três regiões,

de acordo com a distância entre o entorno da foz, todos situados na Vila de Regência, Linhares-ES, sendo: região central à boca da foz do rio Doce – ponto 1 (lat: 7826708,46; lon: 417558,23); região ao norte da foz – ponto 2 (lat: 7842923,74; lon: 428268,74); e região ao sul da foz – ponto 3 (lat: 7814269,72; lon: 399458,35) (figura 4). As características desta área são clima tropical úmido, chuvoso no verão/primavera, seco no inverno/outono, a temperatura média do mês mais quente está acima de 22°C, e a temperatura média do mês mais frio está entre 22°C e 18°C.

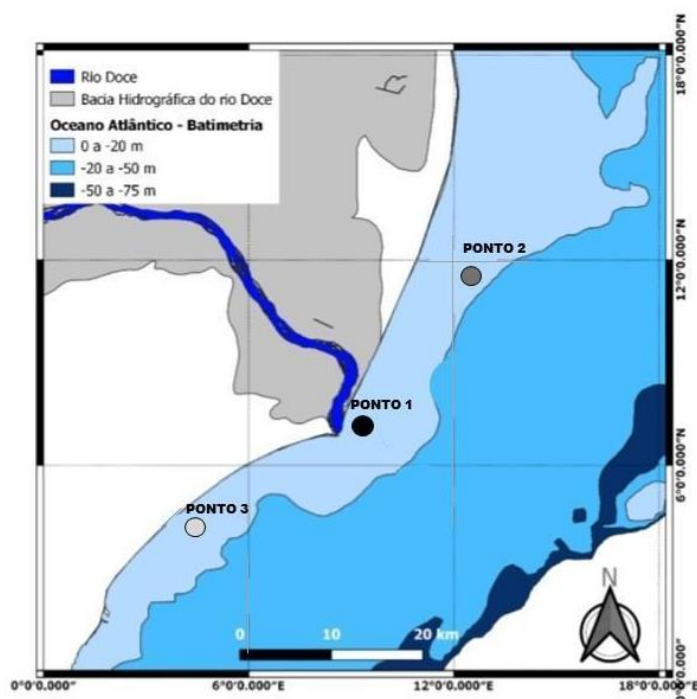


Figura 4: Mapa da foz do rio Doce, costa norte do Espírito Santo, Sudeste do Brasil. Preto: ponto da região central a boca da foz do rio Doce (Ponto 1); Cinza escuro: pontos da região norte da foz do rio Doce (Ponto 2) e cinza claro: pontos da região sul da foz do rio Doce (Ponto 3). **Fonte:** Adaptado de Barbosa (2021).

OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS E PROCESSAMENTO

O material utilizado no presente estudo foi coletado pela equipe da Ecotoxicologia do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática (PMBA), estabelecido pela cooperação firmada entre a FEST e a Renova. Após a coleta, o material ficou disponível para análise no Laboratório de Biologia Estrutural - LABEST.

Foram coletados um total de 36 exemplares de *Cynoscion sp.*, sendo 6 exemplares em cada ponto (1, 2 e 3) e em cada estação. As coletas foram realizadas nos meses de julho de 2021 (estação seca) e nos meses de março de 2022 (estação chuvosa). Os peixes foram coletados com auxílio de rede de arrasto de fundo, ainda

em campo, os exemplares foram identificados, anestesiados com benzocaína (1% em água) e, em seguida, dissecados.

MICROSCOPIA DE LUZ

As brânquias e fígados dissecados foram imersos em solução fixadora Boiun por 8h, de acordo com os protocolos para análises morfológicas. Posteriormente, os fragmentos dos tecidos foram desidratados em concentrações crescentes de etanol, diafanizados em xilol e incluídos em Paraplast (Leica). O material foi seccionado em micrótomo rotativo na espessura de 5 µm e as lâminas coradas com Hematoxilina e Eosina (HE).

ANÁLISES DE DADOS

As alterações histopatológicas observadas nas brânquias e fígados foram categorizadas com base no protocolo originalmente proposto por Bernet *et al.* (1999). A classificação foi realizada levando em consideração a gravidade das lesões, bem como o seu grau de extensão. Dessa forma, as lesões foram avaliadas microscopicamente de acordo com sua extensão: Em relação à gravidade, foram classificadas em: 1: baixo, o que significa que a lesão pode ser reversível ao final da exposição; 2: moderada, se o agente estressor for eliminado, a lesão é reversível; 3: alto, lesão grave e geralmente irreversível, que pode ocasionar a perda parcial ou total do órgão (Tabela 1).

Tabela 1: Alterações histopatológicas em peixes. Baseado em Bernet et al. (1999).

Alterações histopatológicas	Grau de importância
1. Distúrbios Circulatórios	
Hemorragias	1
Aneurismas	1
Edemas Intercelulares	1
2. Mudanças Regressivas	
Alterações citoplasmáticas	1
Inclusões citoplasmáticas	1
Descamação do epitélio	1
Deslocamento da lamela primária	1
Fusão das lamelas secundárias	2
Alterações nucleares	2
Atrofia	3
Necrose	
3. Mudanças Progressivas	
Hipertrofia	1
Hiperplasia das células interlamelares	2
4. Inflamação	
Centro de melanomagrófagos	1
Infiltração de leucócitos	2
5. Tumor	
Benigno	2
Maligno	3

Dessa forma, cada alteração foi designada com um valor entre 0 e 6, refletindo a extensão da alteração: (0) para ausência de alteração; (1-2) para ocorrência leve; (3-4) para ocorrência moderada; (5-6) para ocorrência grave. Assim, o grau do dano apresentado pelo órgão (Índice do Órgão - Iorg) foi estimado pela fórmula (1) onde: rp: padrão de reação, alt: alteração, a: extensão da lesão, w: fator de importância. Já a gravidade das alterações observadas (Índice de Reação - Irp), foi obtida pelo somatório do produto da multiplicação do tamanho da lesão pela relevância patológica - fórmula (2), onde: rp: padrão de reação, alt: alteração, a: extensão da lesão, w: fator de importância. A soma dos índices dos órgãos avaliados representa o índice de lesão do animal.

$$\text{Iorg} = \sum rp \sum alt (a \times w) \quad (1)$$

$$\text{Irp} = \sum alt (a \times w) \quad (2)$$

ANÁLISES ESTATÍSTICA

Os índices dos danos histopatológicos foram comparados entre os diferentes setores e períodos de coleta. Para dados paramétricos foi realizada a análise de variância ANOVA seguidos de teste de Tukey ou Teste T para dados não paramétricos foi adotado o teste de Kruskal-Wallis seguido de Mann-Whitney. Os softwares BioEstat 5.3 e Past foram utilizados para as análises e foi considerado o nível de significância de 5%.

RESULTADOS

Com base nas análises histopatológicas e cálculo dos índices de lesão, na comparação espacial o índice de lesão do animal não apresentou diferença significativa entre os pontos amostrados durante a estação seca. Contudo, evidenciase diferença significativa entre os pontos amostrais, com a variabilidade do ponto 3 (sul da foz) notável na estação chuvosa quando comparado com o ponto 1. Na avaliação temporal, o ponto 3 foi significativo na estação chuvosa (Figura 5).

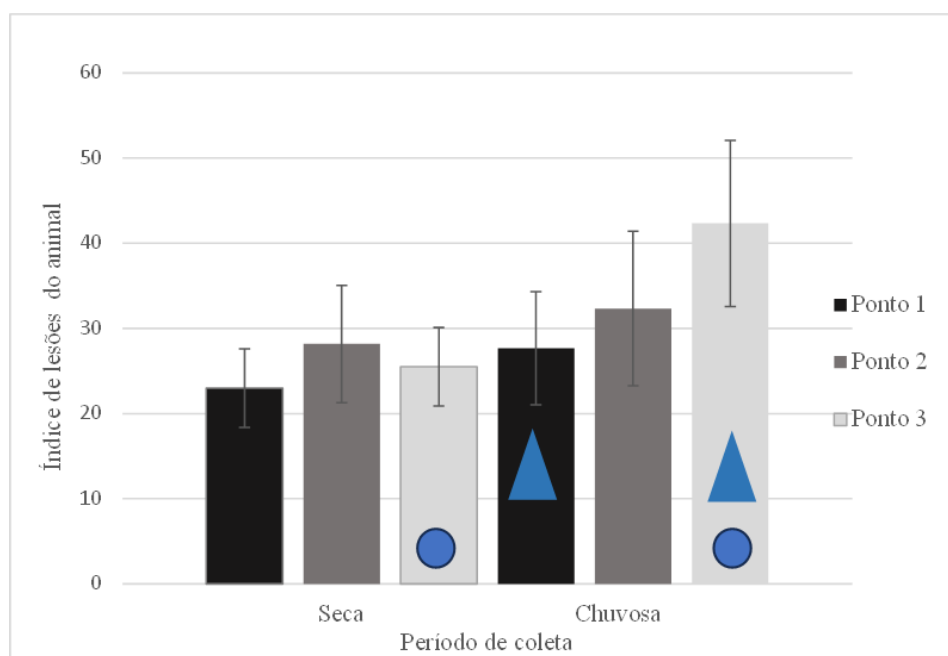


Figura 5: Índice de lesão dos animais coletados em três diferentes regiões adjacentes à foz do rio doce nas estações seca (2021) e chuvosa (2022). Os valores das barras indicam a média e as linhas o desvio padrão. Comparação espacial significativa (triângulos), comparação temporal significativa (bolas).

Os índices de lesão das brânquias dos peixes do gênero *Cynoscion sp.* não apresentaram diferença significativa entre os pontos amostrados durante a estação

seca, em 2021. No entanto, durante o período chuvoso (2022), houve variação significativa entre os pontos de coleta ($p < 0,05$), onde o ponto 3 ao sul da foz apresentou maior índice de lesão quando comparado com o ponto 1. Durante a estação seca e chuvosa, houve uma diferença notável em termos temporais, especialmente durante o período chuvoso. Nesse período, foi observada uma variação estatisticamente significativa ($p < 0,05$), com um aumento significativo nas lesões nos pontos 2 e 3 (Figura 6).

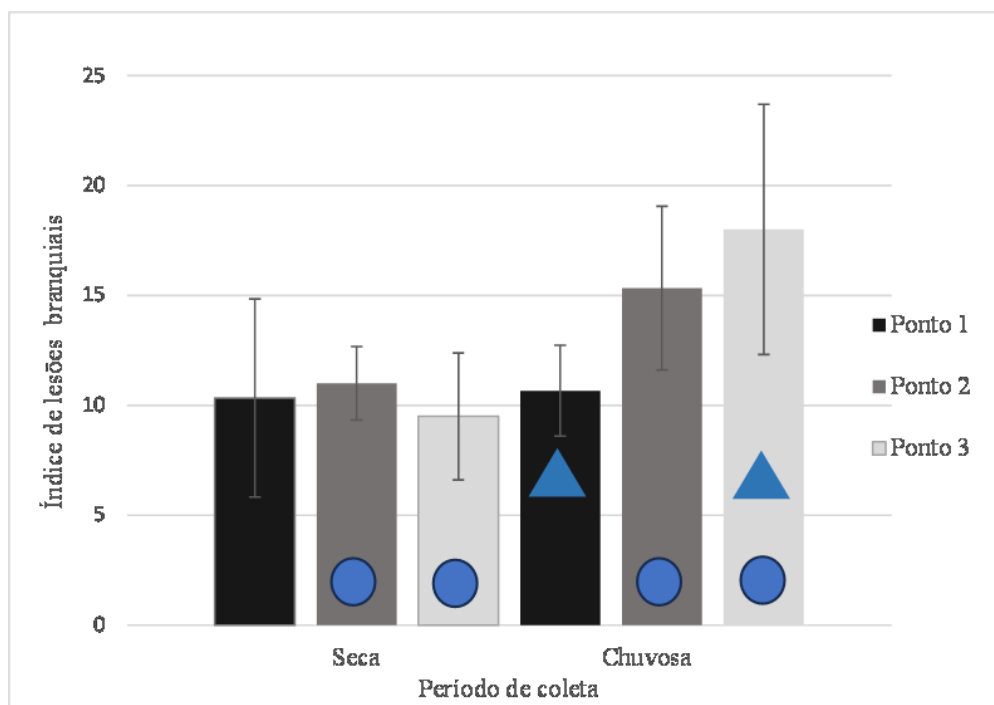


Figura 6: Índice de lesão das brânquias coletados em três diferentes regiões adjacentes à foz do rio doce nas estações seca (2021) e chuvosa (2022). Os valores das barras indicam a média e as linhas o desvio padrão. Comparação espacial significativa (triângulos), comparação temporal significativa (bolas).

Os danos morfológicos observados nas brânquias foram semelhantes entre os espécimes coletados entre as diferentes estações e pontos amostrais (Figura 6). No entanto, a frequência das lesões variou entre os pontos de coleta. As lesões mais frequentes observadas nas brânquias foram apresentadas na Tabela 2 e figura 7.

Durante a estação seca (2021), nos animais coletados ao norte da foz, foram observadas hiperplasia, fusão das lamelas secundárias e hipertrofia com 100% de incidência. Hipertrofia, hiperplasia e fusão das lamelas secundárias foram evidentes em todos os espécimes amostrados na região central da foz, bem como atrofia da lamela secundária com incidência de 66,6%. Já nos exemplares coletados ao sul da foz, as lesões predominantes foram hipertrofia, hiperplasia e fusão das lamelas

secundárias (incidência de 100%), além de descamação do epitélio, que foi observada em 83,3% dos casos.

Na estação chuvosa (2022), nos peixes coletados ao norte da foz, as lesões mais comuns foram fusão das lamelas secundárias (100%), deslocamento da lamela primária e hipertrofia (83,3%) e hemorragia (50%). Nos exemplares amostrados na região central da foz, destacaram-se lesões como hiperplasia e fusão das lamelas secundárias (100%), descamação do epitélio (83,3%), hipertrofia (83,3%), deslocamento da lamela primária (50%), além de atrofia da lamela secundária (50%). Já nos espécimes coletados ao sul da foz, foram observadas hipertrofia, hiperplasia e fusão das lamelas secundárias (100%), descamação do epitélio (83,3%), atrofia da lamela primária (83,3%), deslocamento da lamela primária (66,6%), hemorragia (50%), hipertrofia e atrofia da lamela secundária (50%).

Tabela 2: Frequência (%) das alterações morfológicas nas brânquias de *Cynoscion* coletadas na região costeira adjacente à foz do rio Doce, Linhares/ES.

Lesões branquiais (%)	2021			2022		
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
Hemorragia	50	0	0	50	33,3	50
Congestão	33,3	0	0	16,6	33,3	0
Aneurisma	0	0	0	0	0	0
Descamação do epitélio	33,3	33,3	83,3	0	83,3	83,3
Necrose	16,6	0	0	33,3	33,3	33,3
Deslocamento da lamela primária	0	16,6	0	83,3	50	66,6
Fusão da lamela secundária	100	100	100	100	100	100
Atrofia da lamela primária	0	0	0	33,3	33,3	83,3
Atrofia da lamela secundária	16,6	66,6	33,3	33,3	50	50
Hipertrofia	100	100	100	83,3	83,3	100
Hiperplasia	100	100	100	100	100	100
Parasita	16,6	0	16,6	0	0	0

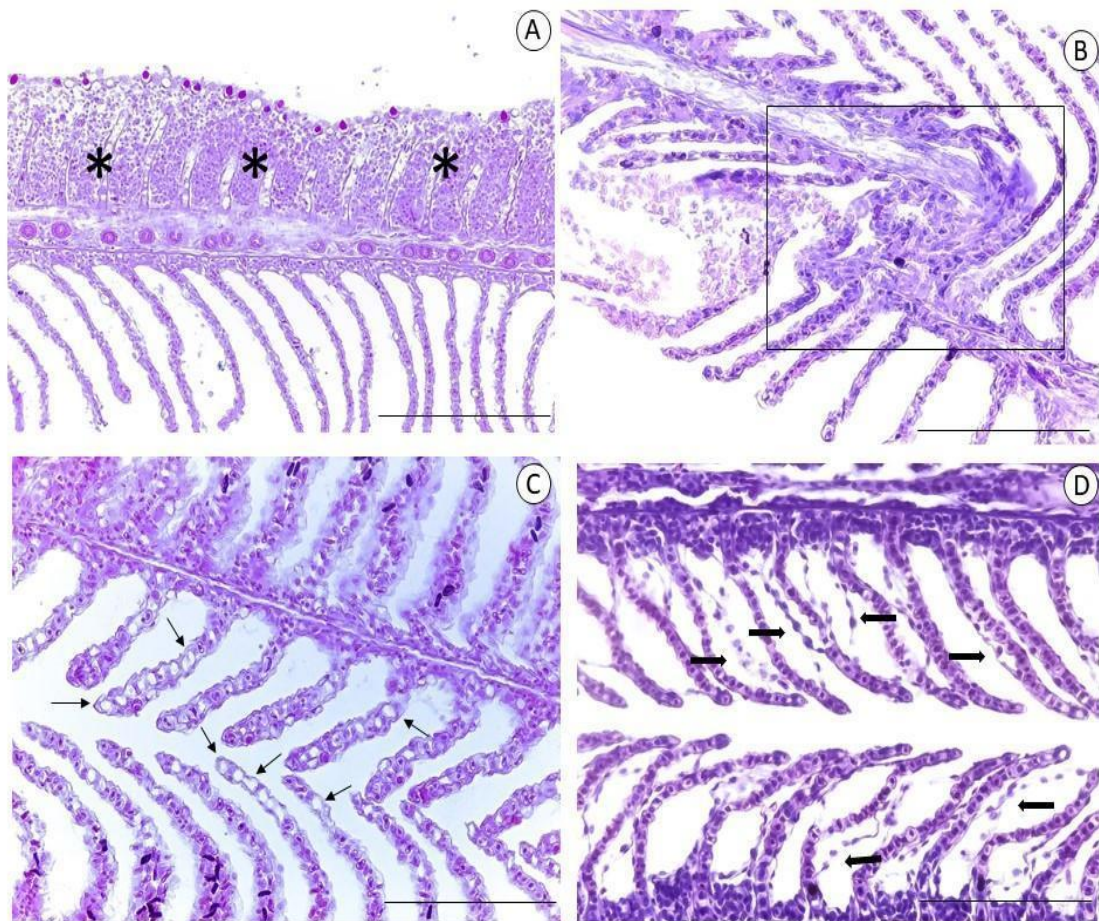


Figura 7: Fotomicrografia de brânquias de *Cynoscion* da região marinha adjacente à foz do rio Doce. A: hiperplasia com fusão das lamelas secundárias (asterisco); B: deslocamento da lamela primária (quadrado); C: hipertrofia (setas finas); D: elevação do epitélio (setas). Coloração: Hematoxilina & Eosina. Barra: A = 20 μ m; B, C e D = 50 μ m.

Da mesma forma que as brânquias, não foi observada diferença significativa ($p > 0,05$) nos índices de lesões hepáticas dos peixes pertencentes ao gênero *Cynoscion* entre os pontos amostrados durante a estação seca de 2021, e na chuvosa de 2022. Em termos temporais, houve diferença significativa, especialmente durante o período de seca. Nesse período, foi observada uma variação estatisticamente significativa ($p < 0,05$), com um aumento significativo nas lesões no ponto 3 (Figura 8).

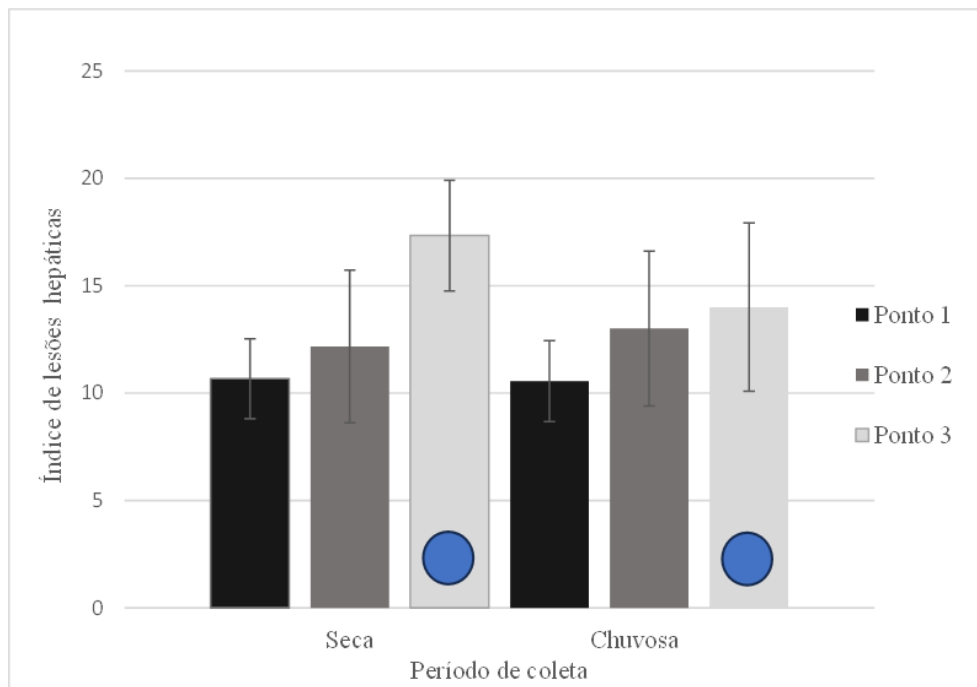


Figura 8: Índice de lesão hepática coletados em três diferentes regiões adjacentes à foz do rio doce nas estações seca (2021) e chuvosa (2022). Os valores das barras indicam a média e as linhas o desvio padrão. Comparação temporal significativa (bolas).

A Tabela 3 e Figura 9 apresenta as lesões mais frequentes identificadas no fígado. Nos peixes coletados ao norte da foz, durante a estação seca de 2021, foram amplamente registradas alterações nucleares e citoplasmáticas nos hepatócitos (100%), bem como atrofia e hipertrofia dos hepatócitos e hemorragia (83,3%). Adicionalmente, foram observados congestão de vasos sanguíneos e parasitas (50%). Na região central da foz, as principais lesões observadas nos peixes foram alterações nucleares e citoplasmáticas nos hepatócitos (100%), hipertrofia e inclusões citoplasmáticas nos hepatócitos (83,3%), hemorragia, congestão de vasos sanguíneos e atrofia dos hepatócitos (50%), além de necrose e infiltração de leucócitos (33, 3%). Já nos espécimes coletados ao sul da foz, predominaram hemorragias e alterações nucleares e citoplasmáticas nos hepatócitos (100%), necrose (83,3%), congestão de vasos e presença de parasitas (50%).

Durante a estação chuvosa de 2022, no fígado dos peixes coletados ao norte da foz, as lesões mais comuns incluíram alterações nucleares e atrofia dos hepatócitos (100%), necrose e hipertrofia dos hepatócitos (83,3%), hemorragia e infiltrados de leucócitos (50%). As principais lesões observadas nos espécimes amostrados na região central da foz foram alterações nucleares, necrose e hipertrofia dos hepatócitos (100%). Nos animais coletados ao sul da foz, foram notadas

hemorragia, congestão de vasos sanguíneos, alterações citoplasmáticas e hipertrofia dos hepatócitos e a presença de centros de melanomacrófagos (83,3%).

Tabela 3-

Tabela 3: Frequência (%) das alterações morfológicas no fígado de *Cynoscion* coletados na região costeira adjacente à foz do rio Doce, Linhares/ES

Lesões hepáticas (%)	2021			2022		
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
Hemorragia	83,3	50	100	50	50	83,3
Congestão	50	50	50	33,3	16,6	83,3
Alterações citoplasmáticas	100	100	83,3	83,3	83,3	83,3
Inclusões citoplasmática	66,6	83,3	33,3	66,6	66,6	66,6
Alterações nucleares	100	100	100	100	100	100
Atrofia	83,3	50	0	100	50	66,6
Necrose	33,3	66,6	83,3	83,3	100	100
Parasita	50	16,6	50	50	33,3	50
Hipertrofia	83,3	83,3	66,6	83,3	100	83,3
Centro de melanomacrófagos	16,6	16,6	0	0	16,6	83,3
Infiltrado de leucócitos	33,3	66,6	83,3	50	50	66,6

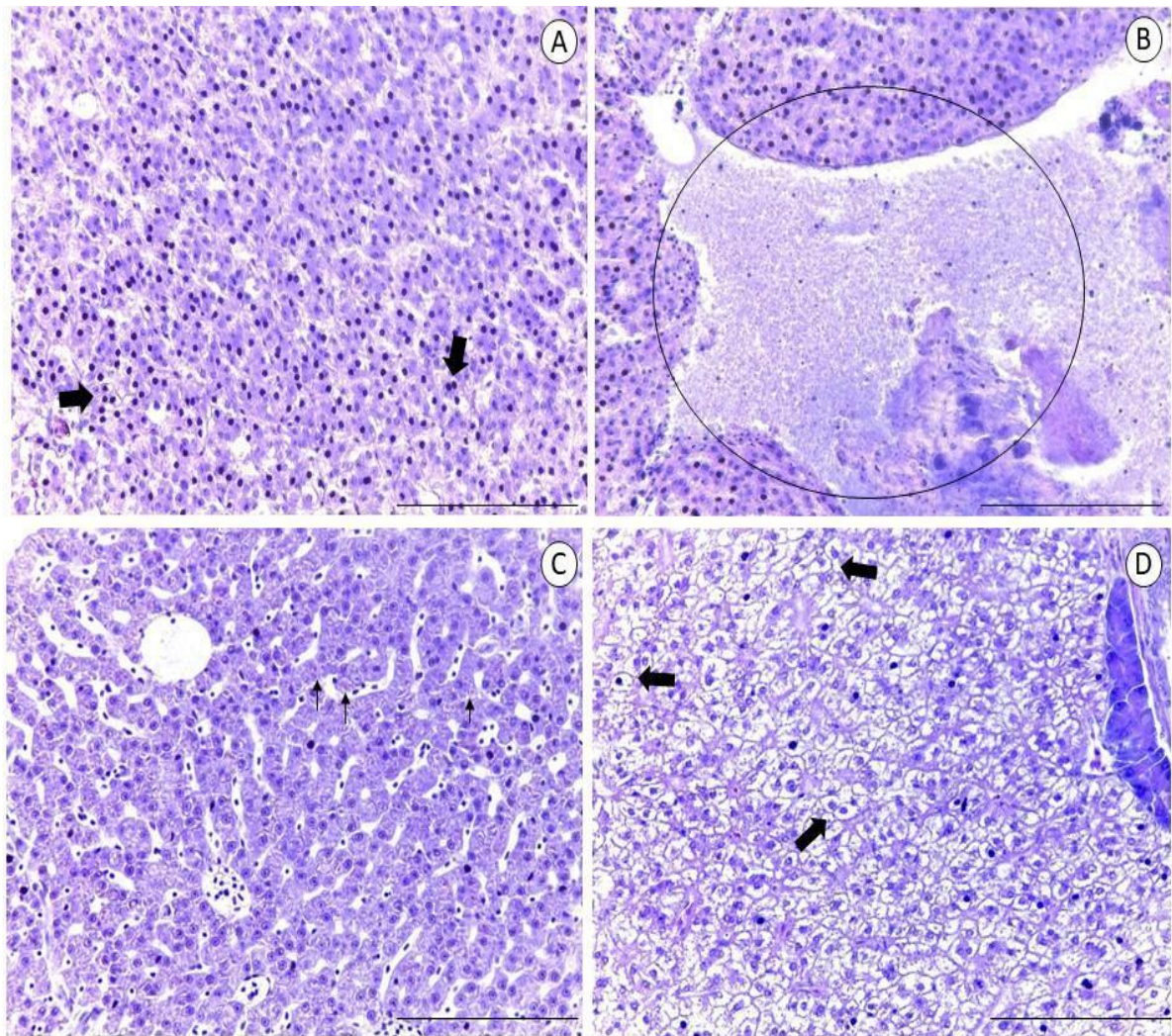


Figura 9: Fotomicrografia de fígado de *Cynoscion* da região marinha adjacente à foz do rio Doce. A: alteração nuclear (setas); B: necrose (círculo); C: inclusões citoplasmáticas (setas); D: hipertrofia (setas). Coloração: Hematoxilina & Eosina. Barra: A, B, C e D = 50 µm.

DISCUSSÃO

Em ambientes aquáticos que sofrem contaminação é comum observar alterações na estrutura e funcionamento dos organismos aquáticos do que episódios de mortandade em massa, conforme salientado por Flores-Lopes & Malabarba (2007). Assim, este estudo avaliou os danos na morfologia branquial e hepática de *Cynoscion* coletados na região costeira situada ao entorno da foz do rio Doce, sete anos após o rompimento da barragem de rejeitos de mineração de Fundão, Mariana – Minas Gerais.

As brânquias, por ser uma interface mais externa entre o peixe e a água, geralmente é o primeiro órgão a ser afetado pela presença de partículas de contaminantes (HEATH, 1995). As mudanças morfológicas nas brânquias que

ocorrem em resposta às alterações ambientais são estratégias adaptativas específicas para a preservação de funções fisiológicas específicas. Alterações na concentração de oxigênio impactam a estrutura das lamelas branquiais dos peixes, influenciando tanto a superfície apical quanto a composição das células de cloreto e das células secretoras de muco. Alguns metais, como o zinco, promovem a multiplicação das células de cloreto, acelerando a perda de íons pelo epitélio e dificultando sua absorção. Além disso, o nitrito compete com o cloro pelos sítios de troca de íons $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ o que pode ser vista como um mecanismo compensatório para manter a concentração interna de íons cloreto em um nível constante (LAURENT & PERRY, 1991).

A hiperplasia surge como resposta à exposição a impurezas, desencadeando adaptações, como o aumento na quantidade de células na base das lamelas. Essas lamelas secundárias consistem em apenas duas camadas de células epiteliais dispostas sobre uma membrana basal, sustentadas por células pilares que separam os capilares lamelares (MELETTI, 2003). A fusão das lamelas secundárias resulta da hiperplasia, onde a proliferação celular se estende ao longo do filamento (MELETTI, 2003, CAMPOS, 2007). Essas lesões resultam em um comprometimento significativo dos canais de água entre os filamentos, levando a uma redução da área de superfície das brânquias e ao aumento na barreira à difusão, proporcionando, assim, uma defesa contra a exposição direta aos contaminantes (MALLATT, 1985). Entretanto, esse processo compromete a função respiratória do órgão (MELETTI, 2003; CANTANHÊDE *et al.* 2014), impactando a manutenção dos equilíbrios ácido-base e osmótico, podendo levar à hipóxia (MALLATT, 1985).

A descamação do epitélio foi uma das alterações observada com alta frequência nas brânquias dos peixes coletados ao sul da foz do rio Doce. Essa lesão caracteriza-se pela dissociação do epitélio pavimentoso simples que reveste as lamelas da sua membrana basal, resultando na formação de áreas onde ocorre acúmulo de líquido intersticial (WENDELAAR BONGA, 1997). Por outro lado, no caso de edema, verifica-se o extravasamento de líquido eosinofílico para o espaço extracelular subepitelial. Ambas essas alterações acarretam uma separação física entre o epitélio branquial e sua membrana basal. Essa particularidade confere uma maior resistência à superfície branquial, contudo, também pode prejudicar a eficácia das trocas gasosas e do transporte iônico (WINKALER, SILVA *et al.*, 2001).

As lesões observadas neste estudo foram semelhantes às aquelas encontradas por Ballotin (2019) ao avaliar brânquias de duas espécies de peixes, *Geophagus*

brasiliensis (cará) (Quoy & Gaimard, 1824) e *Oreochromis niloticus* (tilápia do Nilo) (Linnaeus, 1758), na bacia do rio Doce após o rompimento da barragem em Mariana, Minas Gerais. Também, após o rompimento da barragem de Mariana, Bevitorio *et al.* (2022) apontaram no estudo que abrange a foz do rio Doce e a região litorânea adjacente, lesões similares a este estudo nas brânquias de peixes, como hiperplasia interlamelar, fusão das lamelas secundárias e elevação epitelial. Na estação seca de 2019 na foz do rio Doce, em suas coletas, Barbosa (2021) registrou a observação em 32 exemplares de diversas espécies, incluindo *Cynoscion*, lesões frequentes nas brânquias como hiperplasia, fusão, deslocamento da lamela primária e elevação do epitélio.

Conforme observado por Ptashynski *et al.* (2002), os metais pesados afetam os peixes predominantemente por meio de duas vias de entrada distintas: a primeira ocorre quando os metais entram em contato direto com a superfície das brânquias, através da água, enquanto a segunda via ocorre pela ingestão de alimentos contaminados, ou seja, exposição por meio da dieta. Posteriormente, esses metais são transportados pelo sistema circulatório para atingir órgãos-alvo, como o fígado e os rins.

Dado que o fígado é o principal órgão de metabolização, ele está sujeito à exposição de substâncias provenientes do ambiente (GONZALEZ *et al.*, 1993). Em virtude dos processos de aquisição e metabolização, as lesões observadas no fígado estão intimamente ligadas à exposição crônica às toxinas no ambiente aquático (FLORES-LOPES & MALABARBA, 2007). Zelikoff (1998) destaca que os hepatócitos são frequentemente os primeiros a serem afetados pela toxicidade de uma substância, o que posiciona o fígado como um órgão indicativo da poluição ambiental, tornando a análise hepática uma ferramenta extremamente empregada no biomonitoramento para avaliar a qualidade da água em áreas possivelmente afetadas.

A presença de alterações nucleares, alteração muito frequente identificadas no fígado das espécies do gênero *Cynoscion*, denota mudanças visíveis no núcleo, projetadas pela condensação da cromatina e contração do núcleo em resposta a danos celulares (MUMFORD *et al.*, 2007). A lesão celular pode progredir até um estágio em que a célula se torna incapaz de se adaptar, resultando em uma quebra da homeostase. Isso leva a efeitos histopatológicos irreversíveis no fígado, como a necrose, também observada com frequência nos animais em estudo principalmente na estação chuvosa, que é denominada pelo estado morfológico de uma célula ou

tecido após a perda irreversível da função celular (BERNET *et al.*, 1999; MUMFORD *et al.*, 2007).

A hipertrofia dos hepatócitos é uma lesão frequente em todos os pontos amostrais entre as duas estações analisadas. Essa lesão se manifesta como um aumento no tamanho das células, responsáveis pelo acréscimo de peso do fígado (ASAOKA *et al.*, 2016). Essa hipertrofia pode ser desencadeada por substâncias químicas e está intimamente associada à indução de enzimas metabólicas (MUMFORD *et al.*, 2007; MARARONPOT *et al.*, 2010). A ativação dessas enzimas metabólicas é geralmente considerada uma resposta adaptativa para a desintoxicação de contaminantes (ASAOKA *et al.*, 2016). No entanto, pode ocorrer toxicidade quando as respostas hepáticas ultrapassam as capacidades adaptativas ou quando as mudanças ou enzimas provocadas geram metabólitos prejudiciais influenciados pela natureza e concentração dos contaminantes (MARARONPOT *et al.*, 2010). De maneira semelhante ao presente estudo, a hipertrofia dos hepatócitos também foi documentada por Bevitorio *et al.* (2022) em peixes coletados na foz do rio Doce contaminados por metais pesados, onde foram realizadas quatro coletas amostrais ao longo de dois anos (2018–2020), em períodos sazonais.

Os centros de melanomacrófagos desempenham um papel de suma importância na resposta imunológica e têm sido usados como indicadores biológicos para a avaliação da saúde dos peixes e da contaminação do ambiente aquático (QUALHATO *et al.*, 2018). Os melanomacrófagos representam células de múltiplas funcionalidades que englobam a fagocitose de glóbulos vermelhos, células hematopoiéticas e resíduos celulares, desencadeiam a desintoxicação de moléculas tanto exógenas quanto endógenas, propiciam o armazenamento de ferro proveniente da manipulação de glóbulos vermelhos e acumulam pigmentos variados, tais como melanina, lipofuscina e hemossiderina (QUALHATO *et al.*, 2018).

Além de sua habilidade para a remoção de resíduos e o armazenamento a longo prazo de substâncias tóxicas, os melanomacrófagos desempenham funções nas respostas imunes, tanto inatas quanto adaptativas (BRUM *et al.*, 2018). Dessa forma, a presença de melanomacrófagos nos fígados dos peixes coletados na estação chuvosa ao sul da foz, pode ser atribuída a uma resposta imunológica do organismo, estando, assim, envolvida na eliminação e desintoxicação de partículas específicas.

Neste estudo, observou-se que as brânquias de espécies do gênero *Cynoscion* exibiram uma maior ocorrência de alterações histopatológicas nos locais ao sul da foz do rio Doce, juntamente com níveis mais elevados de lesões nos animais, especialmente durante a estação chuvosa. Conforme indicado pelo monitoramento contínuo pela Rede Rio Doce Mar (RRDM) em 2022, foi notado um aumento significativo no volume de água proveniente do rio Doce durante os períodos de chuva, de outubro a março. Com isso, essa elevação veio acompanhada de uma contaminação persistente por metais dos rejeitos.

Os momentos em que a descarga de sedimentos do rio Doce na região costeira se intensifica são durante eventos hidrológicos em que a vazão do rio ultrapassa os 1.742 m³/s, atingindo níveis de alta vazão e inundação. Durante a estação chuvosa, a pluma do rio segue predominantemente na direção Sul-Sudoeste, correndo paralelamente à costa. Esse padrão é influenciado pelos ventos que geralmente sopram do Norte-Nordeste (N-NE), pelas correntes na direção S-SO. Como resultado dessas características, a dispersão da pluma teve um impacto direto no aumento da turbidez, tanto na superfície quanto ao longo da coluna d'água, e na concentração de material particulado em suspensão ao longo do período de monitoramento (RRDM, 2022).

Juntamente com os achados de Costa *et al.* (2022), onde apontam que a descarga de sedimentos teve uma tendência de deslocamento preferencial para a região sul/sudeste do estuário do rio Doce. Além disso, pesquisas documentaram que durante a estação chuvosa, os rejeitos são ressuspensos na coluna d'água, o que leva ao aumento da disponibilidade de metais. Como resultado, os níveis de sedimentos estuarinos se elevam devido às fortes correntes e sedimentação, o que favorece a ressuspensão dos rejeitos e, conseqüentemente, aumenta a disponibilidade de metais (GABRIEL *et al.*, 2020; MENDES *et al.*, 2020; COSTA *et al.*, 2022). Como resultado, houve uma maior disponibilidade de sedimentos nessa área, o que pode explicar o aumento do índice de lesões em animais encontrados na região ao sul da foz (ponto 3).

O aumento significativo no índice de dano hepático observado no ponto 3 durante a estação seca pode ser associado à exposição crônica a contaminantes. Esse tipo de exposição pode resultar no desenvolvimento de organismos mais tolerantes ao longo do tempo (BEVITORIO *et al.*, 2022). Os resultados desse estudo

indicam que as lesões hepáticas possivelmente não se limitaram apenas ao período analisado neste estudo, mas ocorreram em momentos anteriores, até três anos após o desastre. Essa descoberta contribui para a compreensão do dano morfológico persistente identificado nos tecidos hepáticos, considerando que o fígado é um órgão especialmente sensível, e manifesta uma resposta crônica diante da exposição a contaminantes (BERNET *et al.*, 1999).

Diante do exposto, mesmo decorridos sete anos desde o desastre de Mariana, os índices de lesões nas brânquias e fígados de peixes das espécies do gênero *Cynoscion*, comumente conhecida como pescadinha, ainda são significativos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, V.M.C., NETO, J.A.B., QUARESMA, V.D.S., BASTOS, A.C., ATHAYDE, J.P.M., 2020. **Bioavailability and ecological risks of trace metals in bottom sediments from Doce river continental shelf before and after the biggest environmental disaster in Brazil: the collapse of the Fundão dam.** J. Environ. Manage. v. 272, p. 111086, 2020.

ARAÚJO, E. R.; OLIVIERI, R. D.; FERNANDES, F. R. C.. **Atividade mineradora gera riqueza e impactos negativos nas comunidades e no meio ambiente.** In: Recursos minerais e comunidade: impactos humanos, socioambientais e econômicos. 2014. p. 1-12. Rio de Janeiro, CETEM/MCTI.

Asaoka, Y., Togashi, Y., Mutsuga, M., Imura, N., Miyoshi, T. e Miyamoto, Y. (2016). **Histopathological image analysis of chemical-induced hepatocellular hypertrophy in mice**, Experimental and Toxicologic Pathology, 68(4), pp. 233-239.

BALLOTIN, Letícia Valadares, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2019. **Níveis de metais pesados e histopatologias nas brânquias de duas espécies de peixes da Bacia do rio Doce após rompimento da barragem em Mariana - MG.** Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Biologia Animal.

BARBOSA, J. S.. **Histopatologia de Brânquias e Testículos de peixes da região marinha adjacente à foz do Rio Doce, Linhares/ES após o rompimento da**

barragem de Fundão. 2021. Monografia (Conclusão de Curso) - Curso de Ciências Biológicas da Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2021.

BERNET, D., SCHMIDT, H., MEIER, W., BURKHARDT-HOLM, P., & WAHLI, T. (1999). **Histopathology in fish: proposal for a protocol to assess aquatic pollution**. *Journal of Fish Diseases*, 22 (1), 25–34.

BEVITÓRIO L. Z. SILVA N. G., PIROVANI J. C. M., MARQUES J. A. VIEIRA C. E. D., ZEBRAL Y. D., DAMASCENO E. M., LOPES L. L. R. SANT'ANA L. P., MARUBE L., COSTA S. R., MARTINS C. M. G. SANDRINI J. Z. SOUZA M. M. BIANCHINI A., VALE-OLIVEIRA M. **Impacts of tailings of Fundao dam (Brazil) rupture on marine fish: Metals bioaccumulation and physiological responses**. *Marine Pollution Bulletin* 2022; 177 :113511. PMID: 35303634DOI: 10.1016/j.marpolbul.2022.113511

Brum, A., Pereira, S. A., Cardoso, L., Chagas, E. C., Chaves, F. C. M., Mouriño, J. L. P. e Martins, M. L. (2018). **Blood biochemical parameters and melanomacrophage centers in Nile tilapia fed essential oils of clove basil and ginger**, *Fish & Shellfish Immunology*, 74(3), pp. 444-449.

BRUSLE, J GONZALEZ, I., & ANADON, G. (1996). **The Structure and Function of Fish Liver, in Fish Morphology**. New York: Science Publishers.

CAMPOS, D. Y. F. **Análises das respostas citogenéticas e histopatológicas de peixe *Trematomus newnesi* exposto à água do mar diante da Estação Antártica Brasileira “Comandante Ferraz”, Ilha Rei George, Antártica**. 112f. Dissertação 46 (Mestre em Ciências). Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

CARVALHO, M. S.; RIBEIRO, K. D.; MOREIRA, R. M.; DE ALMEIDA, A. M. 2017. **Concentration of metals in the Doce river in Mariana, Minas Gerais, Brazil**. *Acta Brasiliensis*, v. 1, n. 3, p. 37-41.

COSTA, P.G., MARUBE, L.C., ARTIFON, V., ESCARRONE, A.L., HERNANDES, J.C., ZEBRAL, Y.D., BIANCHINI, A., 2022. **Temporal and spatial variations in metals and arsenic contamination in water, sediment and biota of freshwater, marine and coastal environments after the Fundao dam failure**. *Sci. Total Environ.* 806, 151340 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151340>.

FILHO, M.S.; ANDREWS, E.; MOREIRA, L.; BARRETTO V.; MORAES B.; PRESSINOTTI, L. **Avaliação de biomarcadores histológicos em peixes coletados a montante e a jusante da mancha urbana.** Atas de saúde ambiental. v. 2. n.1, 2014.

Flores-Lopes, F. and A. T. Thomaz (2011). "**Histopathologic alterations observed in fish gills as a tool in environmental monitoring.**" *brazilian journal of biology* 71(1): 179-188.

GABRIEL F, HAUSER-DAVIS RA, SOARES L, MAZZUCO ACA, ROCHA RCC, SAINT PIERRE TD, Saggiaro E, CORREIA FV, FERREIRA TO, BERNARDINO AF. 2020. **Contamination and oxidative stress biomarkers in estuarine fish following a mine tailing disaster.** *PeerJ* 8, e10266. <https://doi.org/10.7717/peerj.10266>

GABRIEL, F. A., SILVA, A. G., QUEIROZ, H. M. FERREIRA, T. O., HAUSER-DAVIS, R. A. BERNARDINO A. F. (2020). **Ecological risks of metal and metalloid contamination in the Rio Doce estuary.** *Integrated Environmental Assessment and Management*, v. 16, n. 5, p. 655-660, 2020.

GINGERICH, W. H. (1982). **Hepatic Toxicology in Fish.** In L. J. Weber (Ed.), **Aquatic Toxicology** (pp. 55-105). New York: Raven Press.

Heath, A. G. (1995). **Water Pollution and Fish Physiology.** Flórida. Hibiya, T. (1982). *An atlas of fish histology: normal and pathological features.* Tokyo, Kodansha.

J. F. **Toxicology of dietary nickel in lake whitefish (*Coregonus clupeaformis*).** *Aquatic*

LAURENT, P.; PERRY, S. F. **Environmental effects on fish gill morphology.** *Physiological Zoology*, v. 64, n. 1, p. 4-25, 1991.

LINS, J.A.P.N.; KIRSCHNIK, P.G; QUEIROZ, V.S.; CIRIO, S.M. **Uso de peixes como biomarcadores para monitoramento ambiental aquático.** *Rev. Acad. Ciên. Agrár. Ambient.* 2010, 8, 469–484.

MALLATT, J. **Fish Gill structural changes induced by toxicants and other irritants: A statistical review.** *Canadian of Journal Fisheries Aquatic Sciences*, Ottawa, v. 42, p. 630-648, 1985

Maronpot, R. R., Yoshizawa, K., Nyska, A., Harada, T., Flake, G., Mueller, G., Singh, B. e Ward, J. M. (2010). **Hepatic enzyme induction: histopathology**, *Toxicologic Pathology*, 38(5), pp. 776-795.

MELETTI, P. C. **Avaliação da degradação ambiental por meio de testes de toxicidade com sedimento e de análises histopatológicas em peixes**. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

MENDES, L. B. MELLO, F. A CHAGAS, K. R. CAMPELO, R. P. M., MEDEIROS, L. C. C. SMITH, R. E. W FURLEY, T. H. (2020). **Ecotoxicological Assessment of the Doce River Surface Water After the Fundão Dam Collapse**. Integrated Environmental Assessment and Management (IEAM), 0–2. <https://doi.org/10.1002/ieam.4291>

Mumford, S., J. Heidel, C. Smith, J. Morrison, B. MacConnell and V. Blazer (2007) **"Fish histology and histopathology "**, 357.

PINTO-COELHO, R. M.. **Existe governança das águas no Brasil? Estudo de caso: O rompimento da Barragem de Fundão, Mariana (MG)**. 2015. Belo Horizonte: Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico, v. 24, nº 1/2, p.16-43, 2015.

PTASHYNSKI, M. D.; PEDLAR, R. M.; EVANS, R. E.; BARON, C. L.; KLAVERKAMP, Qualhato, G., De Sabóia-Morais, S. M. T., Silva, L. D. e Rocha, T. L. (2018). **Melanomacrophage response and hepatic histopathologic biomarkers in the guppy *Poecilia reticulata* exposed to iron oxide (maghemite) nanoparticles**, *Aquatic Toxicology*, 198, pp. 63-72.

RRDM, 2022. Disponível em. In: Relatório Anual 2022 PMBA/ Fest-RRDM - **Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I – Porção Capixaba do Rio Doce e Região Marinha e Costeira Adjacente - RT-07A** RRDM/JUN23. Fundação Espírito-santense de Tecnologia (FEST)/ Rede Rio Doce Mar (RRDM), Vitória, ES, Brasil, p. 1600.

Thomson, R. G. (1978). Patologia geral veterinária. Thophon, S., M. Kruatrachue, E. S. Upatham, P. Pokethitiyook, S. Sahaphong and S. Jaritkuan (2003). **"Histopathological alterations of white seabass, *Lates calcarifer*, in acute and subchronic cadmium exposure. "** *Environmental pollution*. 121: 307-320.

Toxicology, v.58, n.3-4, p.229-247, 2002.

Verboost, P.M., Schoenmakers, T.J.M., Flik, G., Wendelaar Bonga, S.E., 1994. **Kinetics of ATP- and Na⁺-gradient driven Ca²⁺ transport in basolateral membranes from gills of freshwater- and seawater-adapted tilapia.** J. Exp. Biol. 186, 95-108.

Wendelaar Bonga, S. E. (1997). "The stress response in fish." *Physiological Reviews* 77(3): 591-625. Wilkie, M. P. (1997). **"Mechanisms of Ammonia Excretion Across Fish Gills."** *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology* 118(1): 39-50.

WILSON, J. M., & LAURENT, P. (2002). **Fish gill morphology: inside out.** *The Journal of experimental zoology*, 293(3), 192–213. <https://doi.org/10.1002/jez.10124>

Winkaler, E. U., A. G. Silva, H. C. Galindo and C. B. R. Martinez (2001). **"Histological and physiological biomarkers to monitor the health of streams of fish Londrina, Paraná State."** *Acta Scientiarum* 3(2): 507-514.

WOLF, J. C., & WOLFE, M. J. (2005). **A Brief Overview of Nonneoplastic Hepatic Toxicity in Fish.** *Toxicologic Pathology*, 33(1), 75–85. <https://doi.org/10.1080/01926230590890187>

YONKOS, L. T. et al. **Atlas of fathead minnow normal histology.** 2000. Disponível em: <<http://aquaticpath.umd.edu/fhm>>

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto, podemos concluir que mudanças na morfologia das brânquias e nos fígados podem ser consideradas como biomarcadores úteis na avaliação de exposição a contaminantes presentes na água ou em sedimentos. Com isso, avaliação histopatológica apresentada neste estudo têm implicações significativas para respaldar e orientar as medidas de recuperação e preservação da vida aquática na região da foz do rio Doce.

As alterações histopatológicas neste estudo foram semelhantes entre as estações. As lesões mais frequentes nas brânquias foram: elevação do epitélio, hipertrofia, atrofia das lamelas secundárias, hiperplasia com fusão das lamelas secundárias e deslocamento da lamela primária. Já no fígado foram: hipertrofia, necrose, hemorragia, alterações nucleares e alterações citoplasmáticas.

Além disso, a estação chuvosa se destacou em maior grau em comparação com a estação seca. Isso pode ser atribuído à ressuspensão dos resíduos na coluna d'água, impulsionada pelas correntes intensas e pela sedimentação, promovendo a ressuspensão dos rejeitos e, por conseguinte, elevando a disponibilidade de metais.

Diante do exposto, mesmo decorridos sete anos desde o desastre de Mariana, os índices de lesões nas brânquias e fígados de peixes da espécie *Cynoscion*, comumente conhecida como pescadinha, ainda são significativos tanto na estação seca quanto na chuvosa.

Sendo assim, o biomonitoramento é uma fonte preciosa de dados que embasa a tomada de decisões. Ao examinar métricas e padrões, têm-se a capacidade de tomar decisões mais embasadas e estratégicas.